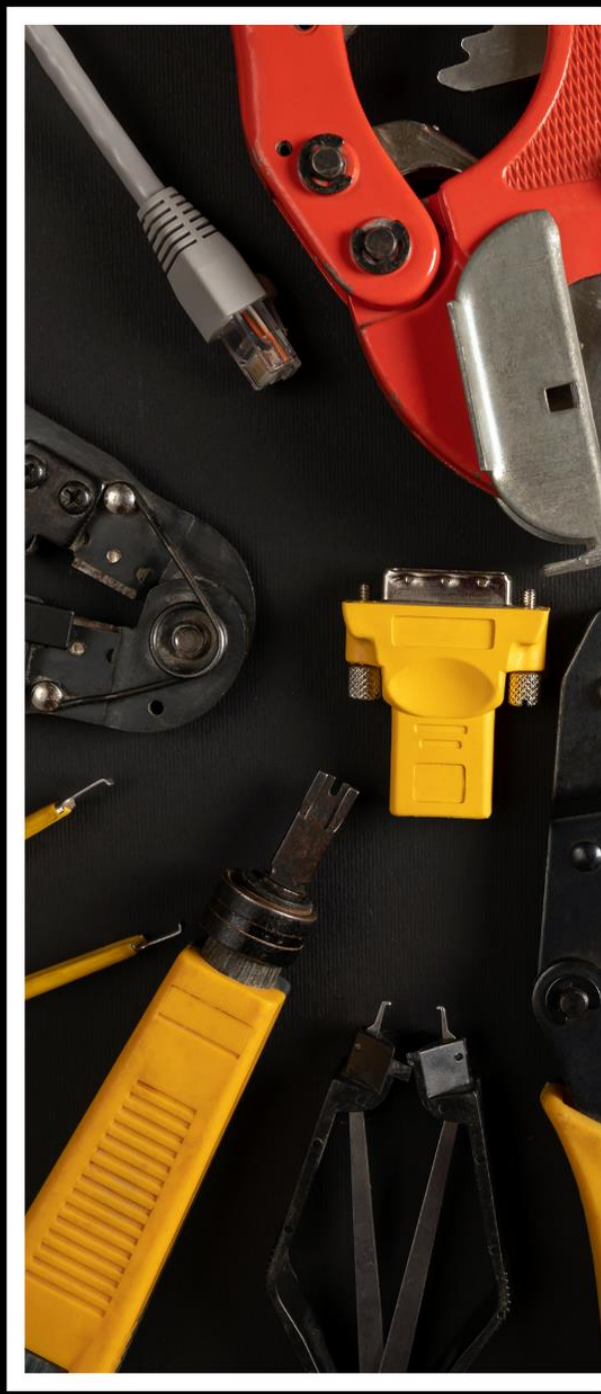
ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADOR
OSVALDO SENA GUIMARÃES



VOLUME 3

Editora Poisson

Osvaldo Sena Guimarães
(Organizador)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 3

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2022

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
Msc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
Msc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
Msc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57
Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 3/
Organizador: Osvaldo Sena Guimarães
– Belo Horizonte - MG: Poisson, 2022

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-179-5
DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação.I. GUIMARÃES, Osvaldo Sena II. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterada.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Simulação de falhas em um processo de produção de uma microempresa calçadista mineira 07

Greiciara Gonçalves dos Santos, Maria Clara de Souza Rodrigues, Maria Aparecida Fernandes Almeida

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.01

Capítulo 2: Análise comparativa da nova Lei 12.305/2010 com a logística reversa de embalagens de produtos químicos utilizados em plataformas 25

Felipe Braga Franco, Giuliana Moreti Batista, Flávio Silva Machado, Mateus Carvalho Amaral, Vanessa End de Oliveira, Maria Helena Teixeira da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.02

Capítulo 3: Reciclagem de resíduos sólidos têxteis: Proposta de fabricação de tecido de malha, utilizando como matéria-prima aparas de tecidos, malhas e nãotecidos descartadas pelas indústrias de confecções de Ibitinga..... 33

Regina Aparecida Sanches, Rafael Bastos Rocha, Adriana Yumi Sato Duarte

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.03

Capítulo 4: Uso de drone na inspeção de barragens de terra no Amazonas..... 44

José Raimundo Rabelo Filho, Maycon Douglas de Oliveira Castro

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.04

Capítulo 5: Ferramenta computacional usada para o dimensionamento de sistemas de refrigeração e análise da viabilidade entre as tecnologias convencional e inverter.... 51

João Vitor Ferreira Araujo, Janine Cavalcante de Oliveira, Fernando Nunes Belchior, Leonardo Queiroz Moreira

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.05

Capítulo 6: Correlação entre tamanho de grão e condutividade elétrica pela técnica de duas pontas..... 71

João Vitor Baptista Salgado, Wellington Mattos Pires, Talita Gama de Sousa, Luiz Paulo Mendonça Brandão

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.06

SUMÁRIO

Capítulo 7: Determinação de propriedades físicas e mecânica de compósitos poliméricos incorporados com resíduo (lama vermelha) do beneficiamento da bauxita 80

Dorivane Cohen Farias, Nayla Gonçalves da Silva, Alessandro José Gomes dos Santos, André Wilson da Cruz Reis, Ana Carolina Ramos da Silva, Deibson Silva da Costa, Larissa Tavares Esquerdo, Gabriel da Silva Gomes

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.07

Capítulo 8: Análise comparativa do comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva e sisal..... 86

Francisco Elton Cesar Junior, João de Almeida Melo Filho

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.08

Capítulo 9: Análise da viabilidade da utilização de concretos com adição de Pó de Vidro Reciclado na construção civil..... 98

Maury Vieira de Oliveira, Mônica Calixto Andrade

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.09

Capítulo 10: Effect of the hot mix asphalt types on rutting properties: identifying significant factors over the pavement performance..... 114

Vivian Silveira dos Santos Bardini, José Leomar Fernandes, Luis Miguel Gutiérrez Klinsky, Tiago Simione Azzoni, Mirela Beatriz Silva, Adriano Bressane

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.10

Capítulo 11: Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos de acordo com as alternativas propostas pela ANEEL..... 125

Victor Rodrigues de Lima, Fernando Nunes Belchior, José Eduardo Stort Fernandes, José Luis Domingos

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.11

Capítulo 12: Análise comparativa das soluções analíticas e numéricas para a concentração de urânio-235 de um reator nuclear PWR. 145

Graziele Daiana Sena de Sousa, Lenilson Moreira Araújo

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.12

SUMÁRIO

Capítulo 13: Simulação do aproveitamento da energia térmica nas águas da costa brasileira por meio de plantas “OTEC” e “SOTEC” de ciclo fechado 152

Marcus Godolphim de Castro Neves, Masoud Ghanbari Kashani, Cassio Roberto Macedo Maia, Ricardo Alan Verdú Ramos

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.13

Capítulo 14: Simulation of tubular reactor for production of methacrylic acid via hydrolysis of methacrylamide sulfate 162

Izabela Silva Freitas, Aryane Maria de Oliveira Lima, Edson de Paiva Alves, Luiz Antônio Magalhães Pontes, Guilherme João Musse Neto

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.14

Capítulo 15: Metalografias de ligas com memória de forma do sistema Cu-Al 166

Carlos Cássio de Alcântara, Daniel Nicolau Lima Alves

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.15

Capítulo 16: Efeito do Ti-B na microestrutura e na dureza de uma liga CuAlMn passível de efeito memória de forma 173

Carlos Cássio de Alcântara, Rodinei Medeiros Gomes, Daniel Nicolau Lima Alves

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.16

Capítulo 17: Software solution for ultra-hard metal alloy design 179

Raphael Basilio Pires Nonato, Thomaz Augusto Guisard Restivo

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.17

Capítulo 18: Theoretical study of the influence of noise, sample rate and rotation in the identification of unbalance in the time domain. 188

Fabio Dalmazzo Sanches, Robson Pederiva

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.18

Capítulo 19: Impactos da idade na atenção e percepção de condutores 197

José Ricardo Gabriel Kuniyoshi, Aurenice Cruz Figueira, Ana Paula Camargo Larocca

DOI: 10.36229/978-65-5866-179-5.CAP.19

Autores: 211

Capítulo 1

Simulação de falhas em um processo de produção de uma microempresa calçadista mineira

Greiciara Gonçalves dos Santos
Maria Clara de Souza Rodrigues
Maria Aparecida Fernandes Almeida

Resumo: Este trabalho apresenta a análise de um sistema de produção de um tipo de calçado em uma indústria calçadista, através de modelagem e simulação computacional, com o software *Arena*®. O objetivo é identificar a interferência de falhas em máquinas ou de operação. Para atingir este fim, foi efetuado o estudo da simulação de sistemas discretos; a execução de um plano de simulação, a implementação e análise das condições de operação do processo produtivo com a simulação de falhas nos equipamentos de forma a identificar a máquina mais crítica da linha. Foram identificadas as interferências de falhas nos recursos das máquinas e nos operadores. O estudo auxiliou na identificação do que as falhas representaram em termos de perda na linha de produção para condição de ociosidade apresentada pela baixa demanda provocada por condições da pandemia de Covid-19. A análise executada contribuiu para a verificação dos efeitos das falhas em recursos para o cenário atual e para um futuro aumento de demanda na definição das perspectivas de produção.

Palavras - chave: Simulação computacional. Software *Arena*®. Simulação de falhas. Indústria Calçadista.

1. INTRODUÇÃO

Em uma organização decisões são tomadas diariamente, no entanto, para que isso ocorra, torna-se necessário obter o máximo de informações que permitam auxiliar na aquisição da melhor opção dentro do contexto proposto. Entretanto, mesmo com todas as informações coletadas ainda podem faltar dados suficientes para a tomada de decisão.

Os métodos computacionais são utilizados para realizar a simulação de sistemas. O emprego da teoria das filas em conjunto com esses métodos é aplicado para gerar uma adequada resolução de problemas, pois permite a inserção de cenários para os seus respectivos estudos (PRADO, 2009). Assim a Pesquisa Operacional (PO) torna-se propícia e importante nessa situação já que utiliza ferramentas quantitativas que torna possível a análise de diferentes cenários através de modelagem e simulação para a tomada de decisão. A simulação feita através de um *software* que proporciona a representação de contextos reais ou mesmo pode prever o comportamento de algo que ainda não exista no mundo real, gerando a possibilidade de analisar várias alternativas de cenários sem a necessidade de aplicar todos eles.

Andrade (2014) cita que um dos maiores desafios atuais das organizações é se manterem competitivas à medida que as condições do ambiente de negócio mudam e se tornam cada vez mais complexas. A competitividade industrial implica que as empresas tenham que conseguir produzir da melhor forma possível, no menor tempo possível e com a melhor qualidade possível (SLACK *et al*., 2018). Dessa forma a análise de falhas para o estudo de otimização e melhoria dos processos torna-se crucial de forma a manter a competitividade industrial da empresa neste mercado altamente competitivo.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009), o conhecimento formal resultante da análise de falhas e da busca da minimização de sua ocorrência provê uma rica variedade de contextos nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade. A confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de quebras ou falhas (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Na indústria competitiva atual, as perdas em qualquer etapa nos processos de produção podem inviabilizar qualquer linha de produção. Esperar que as falhas ocorram para poder intervir, pode ser tarde demais para manter a viabilidade do processo produtivo. Utilizar de recursos que possam minimizar essa situação se torna de grande valia para qualquer empresário. Uma forma de tentar melhorar essa situação proposta em uma das áreas da engenharia de produção é o estudo de análise de simulação de falhas no processo produtivo visando o melhor desempenho das máquinas e equipamentos.

A falha de um equipamento pode ser causada por diversos fatores externos ou internos fazendo com que ele não consiga mais desempenhar sua função. Tal falha pode ser desde a condição de operação da máquina até a disposição do equipamento dentro do processo industrial da fábrica. A redução da quantidade de falhas vem sendo procurada pelas empresas que apreciam ter uma melhora na produção para poderem competir no mercado (YADAV citado por SOUZA *et al*., 2018).

O Relatório Setorial: Indústria de Calçados do Brasil 2019 (ABICALÇADOS, 2019) apresentou que no ano de 2017, o Brasil foi o quarto maior produtor mundial de calçados. Também é o principal produtor fora da região asiática tendo uma expansão 1,1% da produção em 2017, o que representou 4,4% da produção mundial de calçados. Ainda neste relatório, em 2018 quando se analisa a produção do País de forma regional, o maior produtor de calçados é a região Nordeste com 54,1% da produção nacional, seguidas pelas regiões Sul e Sudeste com 22% da produção nacional. Nesse mesmo ano, o estado de Minas Gerais apresentou melhoras de desempenho em relação à indústria nacional passando de 14,4% para 15,3% da produção nacional de calçados. Dentro desse contexto, o Polo calçadista de Nova Serrana representa 50,9% da produção do Estado de Minas Gerais. Esse Polo é formado pelas regiões de Araújos, Bom Despacho, Conceição do Pará, Divinópolis, Igaratinga, Leandro Ferreira, Nova Serrana, Onça de Pitangui, Pará de Minas, Perdigão, Pitangui e São Gonçalo do Pará. Tais dados demonstram a importância da indústria de calçados na economia do País.

A LL Indústria Calçadista (nome fictício definido para manter o sigilo industrial), localizada em Nova Serrana, é uma microempresa de calçados femininos, contendo atualmente cinco funcionários. Cada funcionário é responsável por uma etapa da produção que é executada em um equipamento específico. A empresa realiza a sua produção sobre demanda, com 8 horas diárias de trabalho, e funcionamento de segunda a sexta.

O objetivo geral deste trabalho é analisar o sistema de produção da LL Indústria Calçadista, onde foi efetuada a modelagem e simulação da linha de produção utilizando o *software Arena*® para identificar falhas em máquinas ou de operação. Com o propósito de alcançar os fins desejados, foi necessário trabalhar com objetivos específicos.

Primeiramente, foi necessário desenvolver a análise e simulação dos sistemas discretos. Após tal passo, foi preciso desenvolver o projeto de simulação no software *Arena*® da Rockwell (ROCKWELL, 2014), efetuando os processos necessários para utilizar o mesmo com sucesso. Então posteriormente efetuar a simulação de falhas através da simulação discreta, utilizando de fato os conhecimentos adquiridos no primeiro passo. Posteriormente, houve a necessidade de identificar as máquinas mais críticas, identificando também a interferência das falhas nos recursos das máquinas e a disponibilidade dos operadores do processo produtivo. Por fim, foram identificadas as perdas no processo de produção, sendo então propostos planos de otimização e melhoria. Com base nestes passos, foi possível realizar uma análise completa sobre as a condição de operação do processo produtivo e o que as falhas afetariam no sistema de produção nas condições de operação atuais.

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1. CONFIABILIDADE

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o conceito confiabilidade ganhou um significado tecnológico no final da Primeira Guerra Mundial, a qual foi utilizada para relatar os estudos comparativos medindo o número de acidentes por voo em relação à quantidade de motores nos aviões utilizados na guerra. Os autores continuam a mencionar que a confiabilidade, na década de 1970 estava relacionada a análise de riscos devido à operação e construção de usinas nucleares. E a partir dessa época, a aplicação da confiabilidade foi difundida para diversas áreas. Para Fogliatto e Ribeiro (2009),

> "Confiabilidade é definida como função de um período de tempo, o que implica cinco consequências: (i) o analista deve definir uma unidade de tempo para a realização das análises; (ii) os modelos que descrevemos tempos até falha utilizam a variável aleatória T (em vez de X, como é comum na estatística clássica) para descrever o tempo até falha de um item; (iii) o termo tempo não deve ser interpretado literalmente, já que em muitos contextos o número de milhas ou o número de ciclos pode representar o tempo até falha de um item; (iv) o conceito de confiabilidade deve ser associado a um período de tempo ou duração de missão e (v) a determinação do que deveria ser usado para medir a vida de um item nem sempre é óbvia." (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009, p.3).

Ainda segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), de modo geral, a confiabilidade está relacionada ao funcionamento de um sistema ou produto sem que este apresente falhas ou quebras. Para poder realizar análises em termos de engenharia é necessário que ocorra segundo a probabilidade, uma determinação quantitativa de confiabilidade. Os autores ainda continuam estabelecendo a confiabilidade como uma probabilidade. E que esta deve manifestar valores entre "0" e "1", além disso, nos cálculos de confiabilidade podem ser utilizados os axiomas clássicos da probabilidade (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Venanzi e Silva (2016) mostram a importância da confiabilidade para reduzir a probabilidade de ocorrência de falha e para se considerar o tempo de garantia de atuação do produto. Desta forma, o desempenho do produto está relacionado com a sua propensão de executar suas funções apresentando o menor número de falhas possível.

Silveira *et al* (2019) classificam os itens como reparáveis e não reparáveis, sendo que os itens que possuem a viabilidade de voltar ao seu funcionamento após reparar sua falha são os itens reparáveis. Já os itens que devem ser alterados em seguida da ocorrência de uma falha são os itens não reparáveis.

Ainda segundo Silveira *et al*. (2019) apresenta dois princípios que estão unidos à confiabilidade, o tempo médio entre falhas (MTBF, do inglês *Mean Time Between Failure*), que é empregue em itens reparáveis. E apresenta a equação para realizar o seu cálculo:

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} tbf_i \quad (1)$$

O segundo princípio apresentado pelos autores é o tempo médio até a falha (MTTF, do inglês *Mean Time to Failure*), que é empregue em itens não reparáveis. Silveira *et al*. (2019) também apresentam a equação deste:

$$MTTF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} ttf_i \quad (2)$$

Conforme apresentado por Silveira *et al*. (2019) "onde N é a quantidade de equipamentos, tbf é o tempo entre falhas registrado para cada equipamento [...] e [...] ttf é o tempo para falha registrado para cada equipamento." (SILVEIRA *et al*, 2019, p.45 e 46).

De acordo com a ABNT NBR 5462:1994 falha é definida como o "término da capacidade de um item desempenhar a função requerida" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p.3). Já para Rodrigues (2014), uma falha pode ser provocada por inúmeros fatores inevitáveis que podem ser desde os componentes físicos dos produtos ou serviços, até ser causada por agentes externos. Ainda segundo Rodrigues (2014), essa falha ocorre devido a um atributo ou critério de sistema ou produto que apresenta um desvio não previsto em seu funcionamento.

Para Xenos (1998, p. 68), "existem três grandes categorias de causas [para as falhas]: falta de resistência, uso inadequado ou manutenção inadequada". Ainda no contexto de falhas, Rodrigues (2014, p. 178) diz que "as consequências das falhas afetam diretamente o usuário e podem variar em grau de importância e interferência no objetivo final do processo." e realiza quatro etapas para a determinação das falhas, que serão descritas a seguir:

1. Quando um equipamento apresenta um comportamento anormal, ocorre a Detecção de Falhas.
2. Quando se restringe a falha, ocorre o Isolamento de Falhas.
3. Quando se reconhece a falha, ocorre a etapa de Identificação de Falhas.
4. A última etapa de Análise de Falhas ocorre quando se constata o que causou a falha e assim pode-se notar sua amplitude.

Ainda de acordo com a NBR 5462:1994, é conhecido que a vida útil de um equipamento, trabalhando em condições especificas, possui este tempo de vida quando ele é posto no estado de disponibilidade até o período que ocorra uma sucessão acentuada de falhas que se torne inaceitável ou que torne este maquinário irreparável após uma pane. Para entender estas falhas no equipamento, é necessário conhecer a taxa de falha e de reparo. No entanto, de acordo com Silveira *et al*. (2019) tal equipamento que possua uma taxa de falha (λ) e uma taxa de reparo (μ) constantes devem ser calculados da seguinte maneira de acordo com as equações 4 e 5. O tempo médio para reparo (MTTR, do inglês *Mean Time to Repair*) indicado pela equação 3, "é um indicador de desempenho utilizado na manutenção para contabilizar o tempo médio de reparo de um determinado equipamento ou sistema."

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} ttr_i \quad (3)$$

"[...] onde N é a quantidade de manutenções corretivas realizadas para determinado equipamento e ttr é o tempo de cada manutenção. Em itens não reparáveis, que, após a falha, são descartados, o MTTR é igual a zero." (SILVEIRA *et al*, 2019, p.49 e 50).

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (5)$$

Então, podemos perceber que a taxa de reparos (μ) é o inverso do tempo médio de reparo (MTTR) e que a taxa de falhas (λ) é o inverso do tempo médio entre falhas (MTBF). Tais taxas podem ser inseridas no software de simulação para estudo do sistema.

2.2. SIMULAÇÃO

A simulação é uma das técnicas mais gerais usadas em Pesquisa Operacional. Simular significa reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo, o que nos permite testar algumas hipóteses sobre o valor de variáveis controladas. As conclusões são usadas então para melhorar o desempenho do sistema em estudo". (SILVA et al, 2017, p.120).

> "A simulação tem inúmeras aplicações no mundo atual, nas áreas mais diversas que vão desde produção em manufatura até o movimento de papéis de um escritório. Costuma-se dizer que "tudo que pode ser descrito pode ser simulado." (PRADO, 2010, p.21).

Com o uso da simulação pode-se adquirir uma medição quantitativa da confiabilidade de um sistema quando suas características são conhecidas (PRADO, 2010). Já para Yu (2011), a confiabilidade dos resultados encontrados nos modelos de simulação depende da confiabilidade dos dados utilizados na entrada destes modelos.

> "A principal motivação para se usar simulação é a praticidade. Essa técnica permite que tanto os cenários, quanto os parâmetros que o caracterizam sejam alterados com pouco nível de complexidade. Se a ideia é analisar o desempenho de uma proposta diante de diferentes situações (mudando tráfego, protocolos, escalabilidade etc.) tem-se na simulação uma grande aliada." (JOHNSON; COUTINHO, 2011, p.90).

Segundo Barreto citado por Almeida (2017, p. 10), "O sistema é modelado de acordo com uma sequência ordenada de eventos inter-relacionados, separados por passagem de tempo que descrevem, inteiramente a experiência de uma entidade ao longo do seu fluxo pelo sistema". A modelagem pode ser feita de 3 maneiras distintas (ALMEIDA, 2017):

a. Modelagem por Eventos: o sistema é caracterizado por eventos discretos ao longo do tempo que são utilizados para a sua modelagem.

b. Modelagem por Atividades: o sistema depende de atividades especificas ao longo do tempo que são utilizados para sua modelagem.

c. Modelagem por Processos: o sistema é definido por um conjunto de entidades que define um processo específico, esses processos são utilizados para a sua modelagem.

Devido à expansão do uso do computador na década de 1950 e da linguagem de simulação na década de 1960, as técnicas de simulação visual puderam ser usadas a partir da década de 1980, devido a maior habilidade de comunicação dos microcomputadores. (PRADO, 2010).

> "Cada software de simulação possui uma característica básica que o diferencia dos outros: a "**visão do mundo**". Este termo significa a forma com que o *software* foi concebido, ou como ele vê um sistema a ser simulado. Isto tem como consequência que a maneira como os dados serão fornecidos a cada *software* é diferente dos outros e os relatórios gerados também têm características peculiares." (PRADO, 2010, p. 25).

Segundo Prado (2010, p. 24), "Simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital". Assim, a simulação é uma ferramenta utilizada nas organizações como apoio para a tomada de decisões.

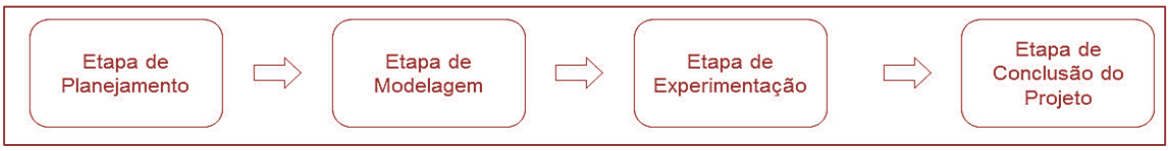
3. METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1. DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE SIMULAÇÃO (PS)

O presente trabalho seguiu o Plano de Simulação (PS) proposto por Almeida (2016), que é um roteiro contendo quatro etapas para auxiliar no desenvolvimento do planejamento e do projeto de simulação. As

quatro etapas a serem seguidas para a elaboração deste trabalho estão esquematizadas como demonstrado na Figura 1 com os ajustes necessários para a execução dele.

Figura 1 – Passos da Modelagem e Simulação



Fonte: Adaptada de Almeida (2016, p.6)

1. Etapa de Planejamento: realizada após serem definidas a formulação, objetivos e análise do problema. Nela será definido o planejamento do projeto, assim como a formulação do modelo conceitual e a coleta das informações e dados. Nessa etapa define quais serão os parâmetros das principais distribuições que irão se adaptar ao modelo, conforme pode ser visto na Tabela 1, que normalmente é utilizada na ausência de dados.

2. Etapa de Modelagem: o modelo formulado será traduzido para o software de simulação *Arena*®, onde será efetuada a sua verificação e validação.

3. Etapa de Experimentação: nesta etapa serão efetuadas várias simulações de experimentos que vão auxiliar na obtenção das informações necessárias para realizar a interpretação e análise estatísticas dos resultados.

4. Etapa de Conclusão: todas as alternativas dos cenários obtidos na etapa anterior serão comparadas em busca de se identificar as melhores soluções para o problema proposto.

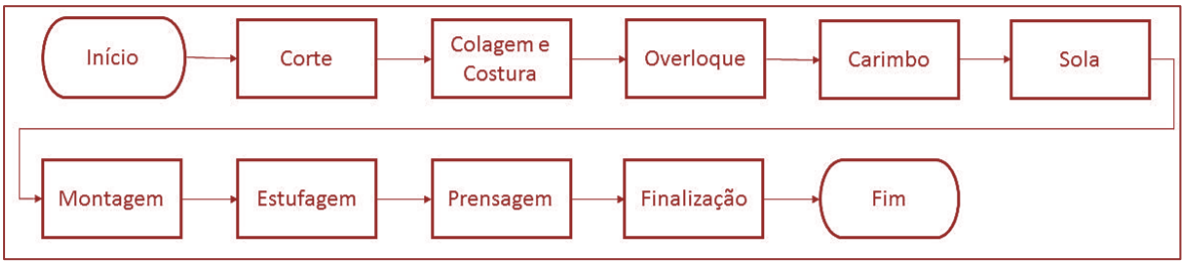
Tabela 1 – Normalmente utilizada na ausência de dados

Distribuição	Parâmetros	Características	Exemplo em uso
Discreta	Valores e probabilidade de ocorrência destes valores	Apenas assume valores fornecidos pelo analista	Escolha de parâmetros das entidades. Usada para valores Intermediários.
Erlang	Média/K	Soma de k variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas exponencialmente.	Tempo de espera em filas, duração de chamadas telefônicas.
Exponencial	Média	Variância alta. Limitada à esquerda, entre chegadas. Ilimitada à direita.	Representa intervalos. Independência entre valores. Muitos valores baixos e poucos valores altos.
Gamma	Beta, Alfa	Faixa da distribuição positiva.	Atendimento
Log Neperiano	Média Logrtm.	Produto de "peças" independentes.	Atendimento
Normal	Média, Desvio Padrão.	Simétrica Variabilidade controlada pelo desvio padrão.	Processos somativos de outros processos. Processos com simetria em relação à média.
Poisson	Média	Número de eventos aleatórios em um intervalo.	Chegada
Triangular	Min, Moda, Max.	Simétrica ou assimétrica. Limitada em ambos os lados.	Duração de atividades. Conhecimento da moda (valor que mais ocorre), o menor valor e o maior valor.
Uniforme	Min, Max	Valores coma mesma probabilidade. Limitada em ambos os lados.	Pouco conhecimento do processo.
Weibull	Beta, Alfa	Função de taxa monótona. Estritamente crescente, decrescente ou constante.	Atendimento.

Fonte: Adaptada de Velloso et al. (2018, p. 6)

A LL Indústria Calçadista segue um macrofluxo no processo de fabricação do de um dos seus modelos de calçados, o qual foi base para a análise neste trabalho chamado de Modelo X. Conforme ilustrado na Figura 2, tal macrofluxo é iniciado no recebimento da matéria prima. Então, segue para as etapas operacionais, nas quais se tem o processo de Corte da matéria prima efetuada no equipamento balancim, passando para o processo de Colagem e Costura, esta costura é efetuada na máquina de costura. Após o processo de Colagem e Costura, a peça segue para o processo Overloque realizado na máquina de overloque, passando para os processos de Carimbo, Sola, Montagem, Estufagem e Prensagem, seguindo para o último processo de Finalização.

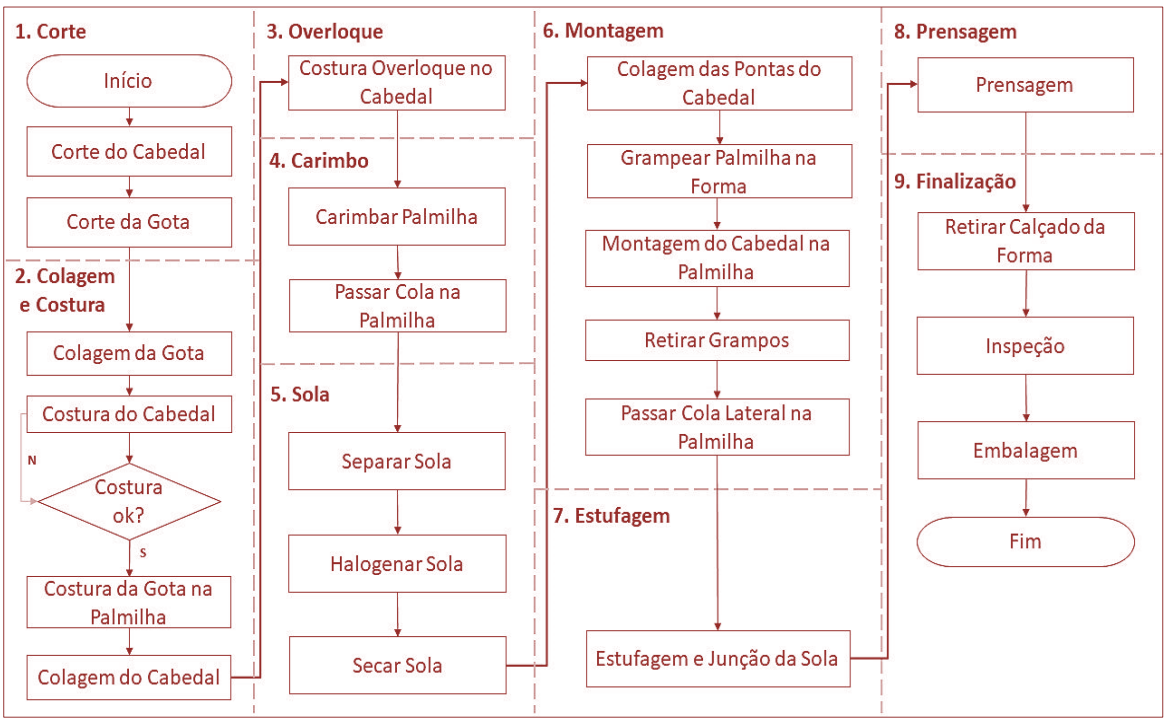
Figura 2 – Macrofluxo do Processo Operacional Simulado do Modelo X



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Seguindo a primeira etapa do PS, foi realizada visita técnica na empresa com o objetivo de observar e conhecer o processo produtivo. Foram realizadas entrevistas estruturadas com os operadores de cada processo, visando coletar o máximo de informações e dados necessários para formular o modelo conceitual. Estes passos viabilizaram o início da segunda etapa do PS que é a tradução do modelo para o software de simulação.

Figura 3 – Fluxograma do Processo Operacional Simulado do Modelo X



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Conforme ilustrado na Figura 3, o fluxograma demonstra o detalhamento do processo de produção do Modelo X, fabricados pela LL Indústria Calçadista. Na visita técnica foi acompanhada a produção de tal modelo de calçado que consiste em vinte e duas etapas. As duas primeiras etapas são realizadas no processo de Corte, que são Corte do Cabedal e Corte da Gota. Seguindo para quatro etapas seguintes presentes no processo de Colagem e Costura. Estas etapas são divididas em Colagem da Gota, Costura do Cabedal, Costura da Gota na Palmilha e Colagem do Cabedal. O próximo processo é o de Overloque que consiste em uma etapa, sendo feita a costura overloque no Cabedal. O processo de Carimbo é subdividido em duas etapas Carimbar Palmilha, Passar Cola na Palmilha. Após é realizado o Processo da sola este é dividido em três etapas: Separação da Sola, Halogenação da Sola e Secagem da Sola. Em seguida o material segue para o processo de Montagem o qual é realizado em cinco etapas: Colagem nas pontas do Cabedal, Grampeamento da Palmilha na Forma, Montagem do Cabedal na Palmilha, Retirada de Grampos, Colagem na Lateral da Palmilha. Seguido pelos Processos de Estufagem e Junção do Calçado na Sola e Prensa. O último processo é o de Finalização, que é composto por três etapas: Retirada do Calçado da Forma, Inspeção e Embalagem do Calçado.

3.2. SIMULAÇÃO DE FALHAS UTILIZANDO O SOFTWARE *ARENA*®

Para simulação de falhas utilizou -se o Software *Arena*® que possui o módulo de dados *Failures* no *template Advanced Process.* Esta funcionalidade permite reproduzir computacionalmente uma falha ou um reparo dos equipamentos do processo de produção. Este módulo permite modelar a mudança de capacidade não planejada ou aleatória, que podem colocar o recurso no estado de "*failed*" ("falha"). Tal módulo faz com que ocorra uma paralisação total do recurso escolhido. Então, quando este recurso fica no estado de "*failed*" ("falha"), todas as unidades presentes nele são interrompidas causando uma indisponibilidade das mesmas (ROCKWELL, 2014).

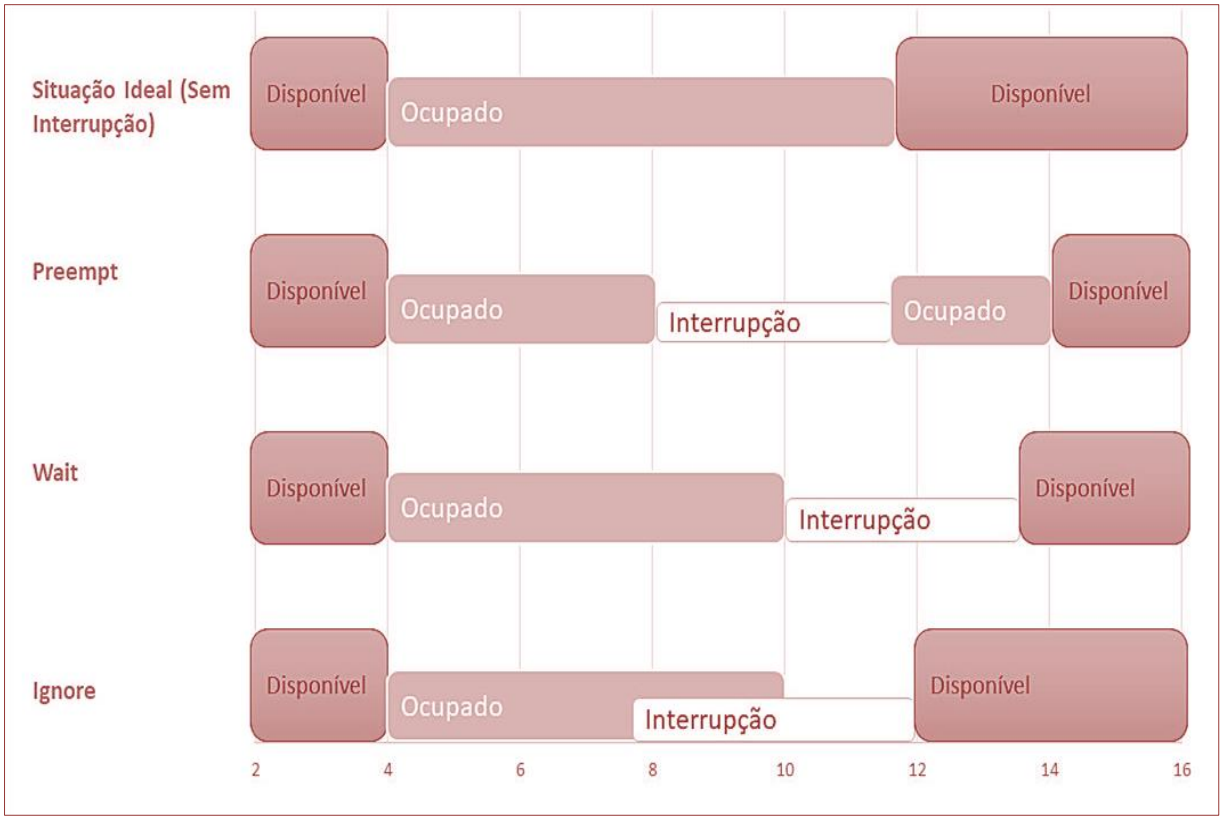
As falhas baseadas em uso ocorrem após o recurso ser liberado. Cada vez que o recurso é liberado, uma contagem é incrementada; quando atinge o número especificado até o valor da falha, o recurso falha. Novamente, se o recurso tem unidades ocupadas, as regras de mudança de capacidade são invocadas (ROSSETTI, 2016).

Um recurso pode ter várias falhas (com base em tempo e contagem) definidas para governar seu comportamento. No caso de várias falhas que ocorrem antes do reparo, as falhas entram em fila e fazem com que os tempos de reparo sejam executados consecutivamente. Neste módulo existem duas formas de se colocar uma falha no recurso. A primeira é baseada em tempo e a segunda é baseada em contagem. A falha baseada em tempo ocorre conforme uma distribuição estatística ou em um espaço de tempo pré-definido. Então, esta falha ocorre somente quando o evento de falha for programado. Quando ela for reparada, tal evento é reprogramado e o tempo para ela ocorrer novamente é reiniciado. Já a falha baseada em contagem ocorre quando se tem definida uma quantidade específica de peças que passam pelo recurso (ROSSETTI, 2016).

De acordo com Rossetti (2016), ao adicionar uma falha em um recurso, o módulo de dados *Failures* possui três opções de regras definidas para aplicar as falhas, que são ilustrados pela Figura 4. Estas falhas ocorrem em um tempo programado pelo usuário que gera a mudança do processo causando o estado de "*failed*" ("falha") no recurso. A primeira é a opção *Wait* (Espera), nela o recurso ocupado por uma entidade aguarda a finalização do seu processamento e, logo após modifica o estado do recurso para que entre no estado de "*failed*" ("falha") ou modifique sua capacidade. A segunda opção definida é a Ignore (Ignorar) que consiste em interromper imediatamente o processamento do recurso, mesmo que ele esteja ocupado pela entidade.

Para isso, ele finaliza o processamento da entidade simultaneamente enquanto efetua a modificação do seu estado, gerando o estado de "*failed*" ("falha") no recurso. Por último, a opção *Preempt* (Antecipação), nela o recurso ocupado por uma entidade paralisa seu estado de ocupação e o modifica para o estado de "*failed*" ("falha"), após cessar este novo estado, e assim que o recurso estiver disponível, o processamento da entidade retorna a partir do ponto onde ocorreu a paralisação do estado de ocupação.

Figura 4 – Opções de Falha



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Para representar um cenário característico de falha temos que, após um período operacional normal (tempo de atividade ou *uptime*) ocorre uma falha em um recurso que está em processamento. Este irá ter seu processamento interrompido e em seguida passará por um tempo de reparo, em que ficará inativo.

São chamadas dependentes da operação, as falhas que ocorrem enquanto o recurso (máquina) está em processamento. Também podem ocorrer as falhas independentes da operação, que são aquelas que ocorrem em recursos muito tecnológicos, que podem falhar independente do status do recurso, pode ser incluído nesse tipo de falha o mau desempenho da máquina, as paradas para ajustes e outros atrasos adicionais, que são modelados em um determinado sistema e podem ocasionar maior tempo de reparo (ROSSETTI, 2016).

De acordo com Rossetti (2016), os estados adicionais de falha e parada, que podem ser descritos como *Down* (Desligada), *Cleaning* (Limpeza), *Adjustment* (Ajuste) entre outros, fazem com que os dois estados fundamentais de uma máquina, *Idle* (Ocioso) e *Busy* (Ocupado) tenham que ser aumentados. No software *Arena*® o usuário pode definir a quantidade de estados que desejar e tem a possibilidade de utilizar os estados já existentes chamados estados automáticos.

Para um recurso modelado no *Arena*® existem quatro estados automáticos: *Idle*, *Busy*, *Failed* e *Inactive*. O usuário pode modelar e definir a mudança de um estado para outro. Por exemplo, o modelador definiu a chegada de uma falha em um recurso "y" do processo, automaticamente este recurso entrará em um estado de falha (*Failed*), caso outro evento seja programado a transição irá ocorrer e o recurso entrará no próximo estado programado (ROCKWELL, 2014).

4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

A produção da LL Indústria Calçadista é feita a partir de demanda do cliente o que significa quando o cliente realiza o pedido a produção é iniciada, ou seja, a sua produção é puxada. Como a microempresa não possuía processos e nem estimativas deles, foi observado o processo de fabricação do Modelo X, para criação do fluxograma e obtenção dos dados necessários para a simulação do processo de produção.

No dia agendado para o levantamento das medições do processo havia somente uma demanda de produção de apenas 24 unidades de sapatos (12 pares) do Modelo X. O tempo diário disponibilizado para a produção do calçado analisado foi de 2 horas (7200 segundos). No restante do dia, de 8 horas diárias, a linha de produção era utilizada para produzir outros modelos de calçados.

Após realizar o acompanhamento da produção foram inseridas as distribuições para o intervalo de tempo em que os materiais chegam para iniciar a produção da fabricação do Modelo X. Na LL Indústria Calçadista a fabricação do Modelo X é feita a partir da demanda de pedidos do cliente.

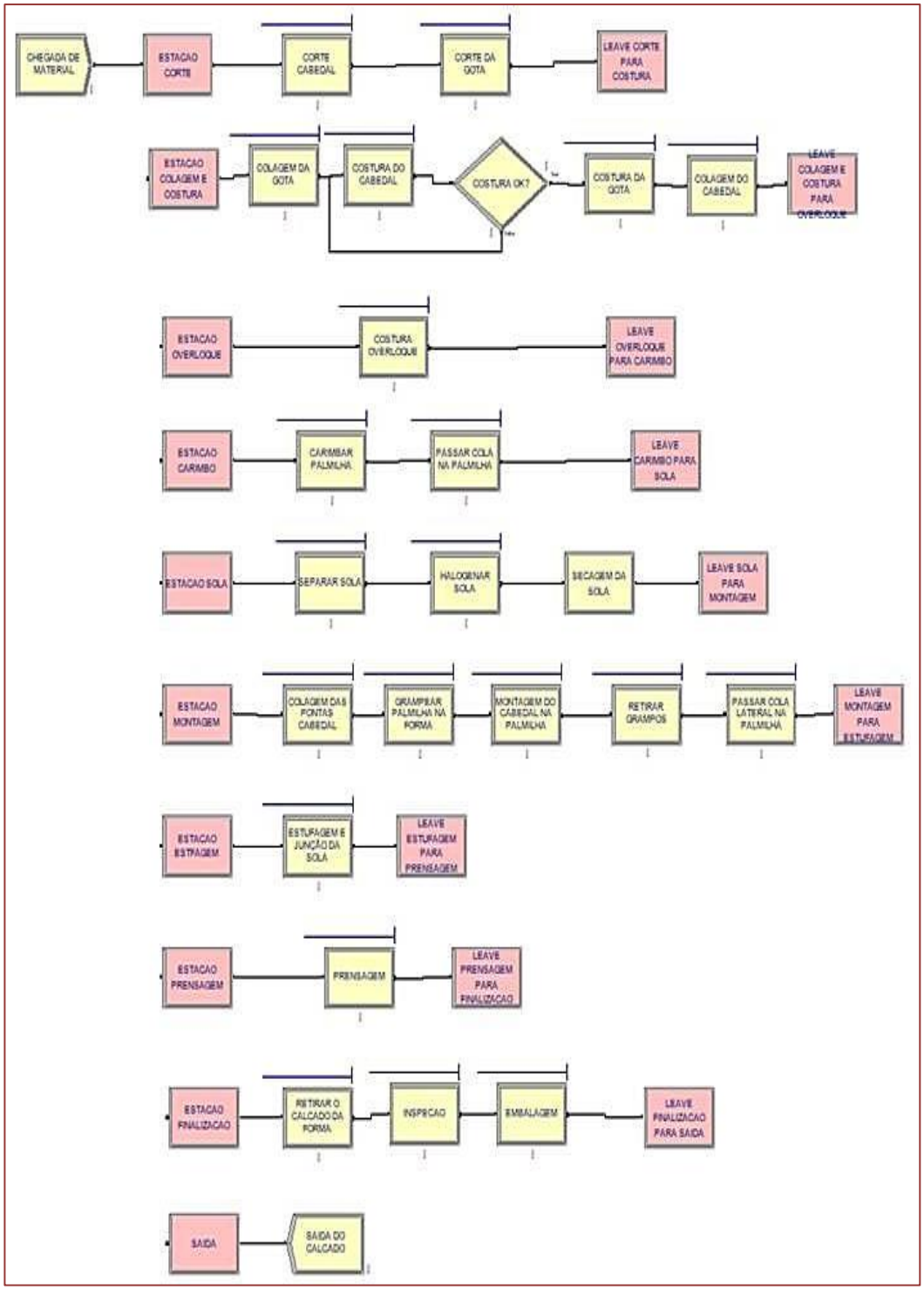
Para as etapas internas dos processos de fabricação foram utilizados a distribuição triangular, com exceção no processo de Prensagem de Calçados, por ser um processo com tempo constante, neste foi utilizada à distribuição constante. Conforme apresentado na Tabela 1, utilizada para representar as condições das etapas do processo de produção, em situações de ausência ou insuficiência de dados. Conforme Almeida (2020, p.48), devido à falta de dados suficientes coletados, a distribuição triangular deve ser utilizada para uma melhor representação do comportamento dos processos. Durante o acompanhamento e análise do processo foi possível medir e levantar os tempos mínimo, máximo e a moda.

A segunda etapa do Plano de Simulação (PS) caracterizada pela Etapa de Modelagem na qual o modelo preparado, apresentado pela Figura 3, foi simulado no software de simulação *Arena*®, apresentado na Figura 5. A verificação e validação consideraram um dia de trabalho de 2 horas diárias. Foram efetuadas 20 replicações para eliminar a insuficiência de dados. Para tanto, foi necessário utilizar no modelo os dados apresentados na Tabela 2. Com os resultados exibidos pelo software foi confirmada a adequação do modelo de simulação a linha de produção do sapato produzido analisado na microempresa.

A Tabela 2 contêm os seguintes títulos das colunas, “Operação” que indica qual o recurso que está sendo utilizado, “Bloco” que indica qual foi o bloco do *Template Basic* ou *Advanced Process* utilizado, “Operador” que indica qual dos cinco operadores da microempresa realiza a etapa do processo, “Rota” que indica para qual estação a entidade irá após terminar o processo em que está, “Mover em Segundos” que indica o tempo gasto entre o deslocamento de uma estação para outra.

Os dois próximos títulos são “Distribuição de Probabilidade” e “Expressão (Segundos)” que demonstram qual foi o tipo de distribuição de probabilidade escolhida para cada recurso do sistema e o seu valor em segundos. O último título “Tempo de Espera (Segundos)” é referente ao tempo de espera em segundos, a ser preenchido no bloco *Delay* do *Template Advanced Process*, para aguardar a secagem da cola na sola do sapato. O bloco da operação chamado “Costura ok?” é um bloco *Decide* do *Template Advanced Process*, o qual indica a verificação da costura do cabedal, conforme os dados levantados, 79% da quantidade de peças que o percorrem seguem no fluxo do processo e que 21% delas retornam com algum erro de costura para a etapa anterior, para ser reprocessado.

Figura 5 – Tela do Modelo Criado no *Software Arena*®



Fonte: Elaborada pelas autoras.

Para melhor representar o fluxograma do processo produtivo e suas respectivas estações de trabalho, presentes na linha de produção do Modelo X, foram utilizados os blocos *Enter* e *Leave* do *Template Advanced Process*.

Tabela 2 – Dados Coletados

Operação	Bloco	Operador	Rota	Mover em Segundos	Distribuição Probabilidade	Expressão (Segundos)	Tempo de Espera (Segundos)
Chegada de Material	Create	-	-	-	Constante	CONST(7200)	-
Estação Corte	Enter	-	-	-	-	-	-
Corte Cabedal	Process	1	-	-	Triangular	TRIA(11,17,21)	-
Corte Gota	Process	1	-	-	Triangular	TRIA(8,9,14)	-
Leave Corte para Costura	Leave	-	Estação Colagem e Costura	60	-	-	-
Estação Colagem e Costura	Enter	-	-	-	-	-	-
Colagem da Gota	Process	2	-	-	Triangular	TRIA(6,8,12)	-
Costura do Cabedal	Process	3	-	-	Triangular	TRIA(17,19,21)	-
Costura ok?	Decide	2	-	-	-	-	-
Costura da Gota	Process	3	-	-	Triangular	TRIA(23,25,28)	-
Colagem do Cabedal	Process	2	-	-	Triangular	TRIA(41,44,47)	-
Leave Colagem e Costura Para Overloque	Leave	-	Estação Overloque	30	-	-	-
Estação Overloque	Enter	-	-	-	-	-	-
Costura Overloque	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(9,12,13)	-
Leave Overloque para Carimbo	Leave	-	Estação Carimbo	10	-	-	-
Estação Carimbo	Enter	-	-	-	-	-	-
Carimbar Palmilhas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(3,4,6)	-
Passar Cola nas Palmilhas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(9,10,13)	-
Leave Carimbo para Sola	Leave	-	Estação Sola	10	-	-	-
Estação Sola	Enter	-	-	-	-	-	-
Separar as Solas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(12,13,16)	-
Halogenar as Solas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(8,9,12)	-
Secagem da Sola	Delay	-	-	-	-	-	900

Tabela 2 – Dados Coletados (continuação)

Operação	Bloco	Operador	Rota	Mover em Segundos	Distribuição Probabilidade	Expressão (Segundos)	Tempo de Espera (Segundos)
Leave Sola para Montagem	Leave	-	Estação Montagem	10	-	-	-
Estação Montagem	Enter	-	-	-	-	-	-
Colagem das Pontas do Cabedal	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(2,5,6)	-
Grampear as Palmilhas nas Formas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(4,6,11)	-
Montagem do Cabedal na Palmilha	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(28,33,52)	-
Retirar os Grampos das Formas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(4,6,9)	-
Passar Cola na Lateral das Palmilhas	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(20,26,35)	-
Leave Montagem para Estufagem	Leave	-	Estação Estufagem	10	-	-	-
Estação Estufagem	Enter	-	-	-	-	-	-
Estufagem e Junção do Calçado na Sola	Process	4	-	-	Triangular	TRIA(21,26,28)	-
Leave Estufagem para Prensagem	Leave	-	Estação Prensagem	10	-	-	-
Estação Prensagem	Enter	-	-	-	-	-	-
Prensagem	Process	4	-	-	Constante	CONST(19)	-
Leave Prensagem para Finalização	Leave	-	Estação Finalização	10	-	-	-
Estação Finalização	Enter	-	-	-	-	-	-
Retirar o Calçado da Forma	Process	5	-	-	Triangular	TRIA(6,7,8)	-
Inspeção	Process	5	-	-	Triangular	TRIA(4,5,7)	-
Embalagem	Process	5	-	-	Triangular	TRIA(15,21,35)	-
Leave Finalização para Saída	Leave	-	Saída	10	-	-	-
Saída	Enter	-	-	-	-	-	-
Saída do Calçado do Processo	Dispose	-	-	-	-	-	-

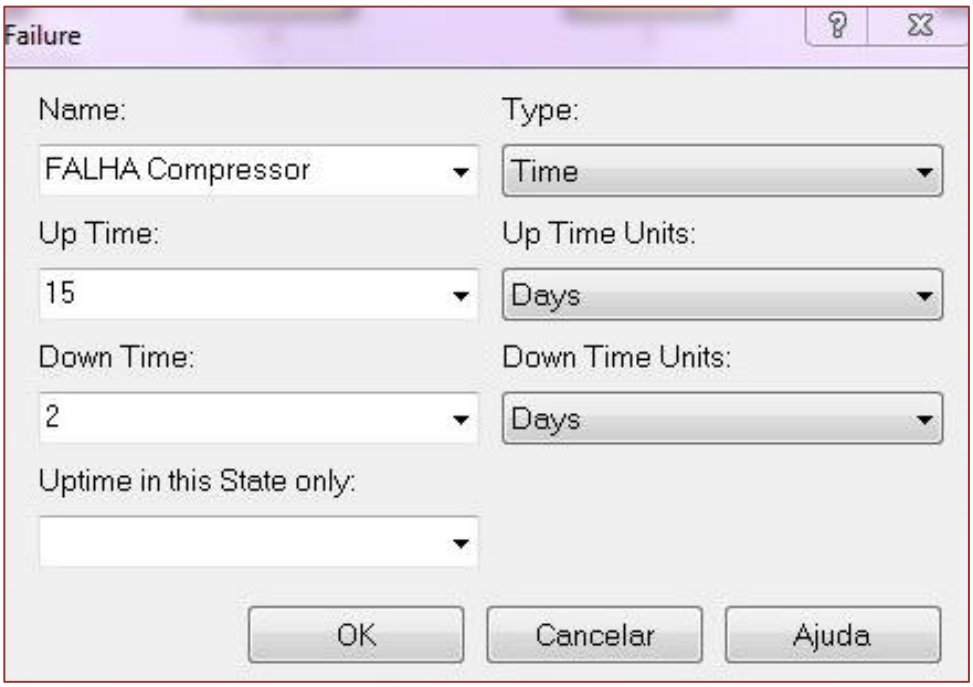
Fonte: Elaborada pelas autoras.

4.2. INTRODUÇÃO DE FALHAS NO MODELO SIMULADO

Após execução e aprovação do modelo, passamos para a terceira etapa do PS sendo caracterizada pela experimentação. Com os dados da modelagem foram executadas rodadas para as várias condições para as análises. Em todas as simulações foram realizadas 20 replicações para evitar a inconsistência de dados. Foram efetuadas simulações de condição de trabalho da fábrica para 20 e 25 dias, realizado pelos operadores na fabricação do Modelo X. Considerando a hipótese de demandas sucessivas de 24 unidades de sapatos que são efetuados durante as 2 horas diárias trabalhadas, como replicações sucessivas das condições levantadas na visita de campo.

Posteriormente às simulações de operação "normal" (sem falhas) foi implementado no sistema a hipótese de uma falha grave baseada em tempo de operação, como uma parada do compressor, demonstrado na Figura 8, situação citada como ocorrida no mês de visita à microempresa. Tal falha paralisa os processos de colagem, de prensagem, de grampeamento e de carimbo no sistema analisado. Situação que foi simulada para ocorrer após 15 dias de operação implicando em uma parada de 2 dias de trabalho no compressor, até ser efetuada sua reparação.

Figura 8 – Introdução de Falha no Sistema



Fonte: Elaborada pelas autoras a partir do software *Arena*®.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados apresentados na Tabela 3 apresentam a simulação do ciclo de operação da produção do Modelo X pela Microempresa LL Indústria Calçadista, nas condições de operação reduzidas devido a Pandemia do Covid-19, ocupando a linha de produção para o modelo citado em apenas 2 horas de produção diária para atender a demanda do cliente de 24 unidades de sapato. A Tabela 4 também apresenta as simulações nas mesmas condições da Tabela 3, para uma demanda de produção que ocupando a linha durante 20 e 25 dias de trabalho, sem qualquer interrupção no ciclo produtivo. Para todas as simulações foram consideradas 20 replicações do processo produtivo, para eliminar todas as inconsistências que poderiam ser geradas, que ocorriam em números menores de replicações.

Tabela 3 – Simulação de Operação Sem Interrupções

Parâmetros						
Number of Replications (Número de Replicações)	20			20		
Replication Length (Duração da Replicação em Dias)	20			25		
Hours Per Day (Horas por Dia)	2			2		
Resultados						
Statistics (Estatisticas)	Average (Média)	Minimum Value (Valor Mínimo)	Maximum Value (Valor Máximo)	Average (Média)	Minimum Value (Valor Mínimo)	Maximum Value (Valor Máximo)
Time (Tempo em Minutos)						
VA Time (TA)	20,649	19,889	22,411	20,651	19,889	22,411
Wait Time (TF)	46,721	9,355	66,917	46,705	9,355	66,917
Transfer Time	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667
Total Time (TS)	70,037	32,465	90,225	70,023	32,465	90,300
Other (Outros)						
Number In	480,000	-	-	600,000	-	-
Number Out	480,000	-	-	600,000	-	-
Work In Process (WIP)	14,007	0,000	24,000	14,005	0,000	24,000
Usage (Utilização)						
Instantaneous Utilization (Taxa Ocupação)						
Maq. Balancim	0,088960	0,000	1,000	0,088953	0,000	1,000
Maq. de Carimbar	0,014437	0,000	1,000	0,014439	0,000	1,000
Maq. de Costura	0,164500	0,000	1,000	0,164500	0,000	1,000
Maq. Estufa	0,082240	0,000	1,000	0,082288	0,000	1,000
Maq. Grampeador	0,024454	0,000	1,000	0,024470	0,000	1,000
Maq. Overloque	0,037767	0,000	1,000	0,037768	0,000	1,000
Maq. Pistola de Cola 1	0,186600	0,000	1,000	0,186500	0,000	1,000
Maq. Pistola de Cola 2	0,014434	0,000	1,000	0,014428	0,000	1,000
Maq. Prensa	0,063333	0,000	1,000	0,063333	0,000	1,000
Operador 1	0,088960	0,000	1,000	0,088953	0,000	1,000
Operador 2	0,186600	0,000	1,000	0,186500	0,000	1,000
Operador 3	0,164500	0,000	1,000	0,164500	0,000	1,000
Operador 4	0,586400	0,000	1,000	0,586500	0,000	1,000
Operador 5	0,103400	0,000	1,000	0,103700	0,000	1,000

Legenda:
TA = tempo de valor agregado
WIP = peças em processamento
TF = tempo em fila
Number In = n° de materiais que entram do sistema
TS = tempo total no sistema
Number Out = n° de unidades (pés) de sapato que saem do sistema
Transfer Time = tempo de deslocamento entre estações

Fonte: Elaborada pelas autoras a partir dos resultados do software *Arena*®.

O processo de produção do Modelo X nas condições apresentadas para um dia de trabalho produziu as 24 unidades (pés de sapatos) conforme especificado na validação. Como pode ser observado pelos resultados apresentados na Tabela 3, para 20 e 25 dias respectivamente produz 480 e 600 unidades de sapatos, o que corresponde aos múltiplos da quantidade de dias do processo produtivo básico. Também, pode ser observado que o *Number In* foi o mesmo que o *Number Out*, o que significa que a mesma quantidade de material que entrou em todos os dias simulados do sistema saiu dele como unidades de sapato.

O ponto principal a ser destacado indicado pelos resultados apresentados na Tabela 3 foi a Ociosidade presente no sistema de produção da linha de produção do Modelo X nas condições levantadas. Tal ociosidade pode ser verificada pelos baixos índices de utilização dos equipamentos e dos operadores durante o processo produtivo. A taxa de utilização da Máquina Pistola de Cola 1 é de apenas 18,66% que é a máquina mais ocupada em 20 dias de produção, já o Operador 4, que realiza a maioria das etapas do processo produtivo esteve 58,64% do seu tempo de trabalho ocupado, os demais operadores e máquinas possuem índices de ocupação bem inferiores. Tais índices possuem o mesmo padrão para 25 dias de simulação.

A grande ociosidade apresentada foi fundamental para a definição da simulação de falhas apresentadas no sistema. Pequenas falhas, que poderiam ser adicionais, não interfeririam no processo produtivo, considerando que ele dispõe de tempo de folga para recuperar a sua produção perdida. Desta maneira, a introdução de pequenas falhas no sistema de produção se torna desnecessária, de forma que ele se recupera das perdas geradas durante o processo produtivo.

A Tabela 4, que apresenta as mesmas condições de simulação da Tabela 3, com a introdução de uma falha grave em um equipamento que mantêm a operação de várias etapas do processo produtivo. Foi considerado nesta simulação uma quebra do compressor no período após 15 dias de produção, considerando que o tempo demandado para a sua recuperação seria de 2 dias de trabalho. A parada do compressor paralisa os processos de colagem, de prensagem, de grampear e de carimbar no sistema analisado.

Como a simulação das falhas ocorre após 15 dias, a Tabela 4 não apresenta a introdução de falhas em um dia de trabalho, visto que tal falha nunca ocorreria, pois o processo de produção se conclui antes da ocorrência desta falha.

Apesar da falha simulada paralisar várias etapas do processo produtivo por 2 dias de trabalho, a queda da produção em 20 dias foi uma redução de 480 para 468 unidades de sapatos, causando uma perda de 12 unidades de sapato, 2,5% da produção. Diante dos dados apresentados pela perda de tal produção, simulamos a mesma falha nas mesmas condições de produção para um período 25 dias de trabalho. O que se constata é que a não houve perda de produção, pois ele deveria produzir 600 unidades de sapato, o que foi obtido devido a ociosidade do sistema diminuir, mas ainda foi suficiente para conseguir se recuperar. Desta forma, a introdução de tal falha alterou o tempo de espera de 46,754 para 80,1420 minutos. Consequentemente aumentando o tempo total de produção de 1 unidade de sapato de 70,0227 para 103,46 minutos.

Tabela 4 – Simulação de Operação Com Interrupções

Parâmetros						
Number of Replications (Número de Replicações)	20			20		
Replication Length (Duração da Replicação em Dias)	20			25		
Hours Per Day (Horas por Dia)	2			2		
Falha Compressor Up Time em Dias	15			15		
Falha Compressor Down Time em Dias	2			2		
Resultados						
Statistics (Estatisticas)	Average (Média)	Minimum Value (Valor Mínimo)	Maximum Value (Valor Máximo)	Average (Média)	Minimum Value (Valor Mínimo)	Maximum Value (Valor Máximo)
Time (Tempo em Minutos)						
VA Time (TA)	20,650	19,889	22,411	20,652	19,889	22,411
Wait Time (TF)	88,143	9,355	464,490	80,142	9,127	464,490
Transfer Time	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667	2,667
Total Time (TS)	111,460	32,465	488,610	103,460	32,012	488,610
Other (Outros)						
Number In	480,000	-	-	600,000	-	-
Number Out	467,550	-	-	600,000	-	-
Work In Process (WIP)	22,336	0,000	81,000	20,692	0,000	81,000
Usage (Utilização)						
Instantaneous Utilization (Taxa Ocupação)						
Maq. Balancim	0,088957	0,000	1,000	0,088923	0,000	1,000
Maq. de Carimbar	0,014443	0,000	1,000	0,014435	0,000	1,000
Maq. de Costura	0,164700	0,000	1,000	0,164600	0,000	1,000
Maq. Estufa	0,081572	0,000	1,000	0,082268	0,000	1,000
Maq. Grampeador	0,024440	0,000	1,000	0,024492	0,000	1,000
Maq. Overloque	0,037777	0,000	1,000	0,037767	0,000	1,000
Maq. Pistola de Cola 1	0,186600	0,000	1,000	0,186500	0,000	1,000
Maq. Pistola de Cola 2	0,014436	0,000	1,000	0,014440	0,000	1,000
Maq. Prensa	0,061781	0,000	1,000	0,063333	0,000	1,000
Operador 1	0,088957	0,000	1,000	0,088923	0,000	1,000
Operador 2	0,186600	0,000	1,000	0,186500	0,000	1,000
Operador 3	0,164700	0,000	1,000	0,164600	0,000	1,000
Operador 4	0,584200	0,000	1,000	0,586600	0,000	1,000
Operador 5	0,100900	0,000	1,000	0,103700	0,000	1,000

Legenda:
TA = tempo de valor agregado
WIP = peças em processamento
TF = tempo em fila
Number In = n° de materiais que entram do sistema
TS = tempo total no sistema
Number Out = n° de unidades (pés) de sapato que saem do sistema
Transfer Time = tempo de deslocamento entre estações

Fonte: Elaborada pelas autoras a partir dos resultados do software *Arena*®.

5. CONCLUSÃO

Apesar da LL Indústria Calçadista estar em regime reduzido de produção devido a Pandemia do Covid-19, o que provocou a maior disponibilidade no sistema, comprometendo uma condição crítica de análise de falha.

A análise do processo de produção e a tradução do mesmo para introdução no software *Arena*®, para realizar a simulação de produção e a introdução da simulação com falhas no processo produtivo, nas condições apresentadas, já permite vislumbrar vários ajustes, que podem ser efetuados no processo, visando a sua otimização, através dos índices de disponibilização de máquinas e operadores.

Com a simulação e análise de falhas no processo, mesmo com uma grande ociosidade, foi possível detectar o que essa falha representa em termos de perda na linha de produção. O que se torna relevante, as análises de simulação de possibilidade, mesmo para condição de ociosidade apresentada.

No caso apresentado, a introdução da falha de 2 dias de parada no sistema em intervalos de 15 dias de trabalho provocou a diminuição da produção de sapatos, na simulação de 20 dias de trabalho de 2 horas diárias. Quando foi aumentado o tempo em dias de 20 para 25, a ociosidade presente no sistema fez com que esta falha não provocasse uma perda na produção. A análise desta falha apresentada foi capaz de determinar o tempo mínimo de recuperação da produção mesmo com a introdução de uma falha grave.

Quando a microempresa vier a trabalhar em condições de maior demanda, esta análise pode ser de fundamental interesse para a definição das perspectivas de produção. Com a análise da simulação de falhas é possível levantar a expectativa do tempo mínimo necessário para a produção de uma demanda esperada considerando um conjunto de interrupções geradas no sistema.

REFERÊNCIAS

[1] ABICALÇADOS. Relatório Setorial: Indústria de Calçados do Brasil 2019. Associação Brasileira das Indústrias de Calçados. Novo Hamburgo, RS, 2019.

[2] ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. Notas de Aulas – Teoria – Pesquisa Operacional II. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, 2017.

[3] ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. Notas de Aulas – Laboratório Pesquisa Operacional II: Simulação. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, 2020.

[4] ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes. PS-Simulato© – Diretrizes para Elaboração de um Plano de Simulação. Belo Horizonte: Simulato – mafa@ieee.org, 2016.

[5] ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. Introdução à pesquisa operacional: métodos para análise de decisões. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e mantenabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. Disponível em: < https://pt.slideshare.net/eavargas2512/nbr-5462-2> Acesso em: 25 ago. 2020.

[7] FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. Confiabilidade e manutenção industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. xvi, 265 p.

[8] JOHNSON, Thienne de Melo e Silva Mesquita; COUTINHO, Mauro Margalho. Avaliação de desempenho de sistemas computacionais. Rio de Janeiro LTC 2011.

[9] PRADO, Darci S. Teoria das filas e da simulação, 2ª Edição, Belo Horizonte: Editora IDG, 2009.

[10] PRADO, Darci S. Usando o ARENA em Simulação. 4ª. ed. Belo Horizonte: Ed. Falconi, 2010.

[11] ROCKWELL, Automation. Arena User's Guide. [SI]: Rockwell Automation, Inc., 2014. 112 p.

[12] RODRIGUES, Marcus Vinícius. Ações para a qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade. 5. ed. Revisa da e ampliada. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

[13] ROSSETTI, Manuel D. Simulation Modeling and Arena®. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 719 p.

[14] SILVA, Ermes Medeiros da; GONÇALVES, Valter; MUROLO, Afrânio Carlos. Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia: programação linear: simulação. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: Atlas, 2017. E-book (162 p.)

[15] SILVEIRA, A. M. ; VILSEKE, A. J. ; PEZZATTO, A. T. ; GREGORIO, G. F. P. Confiabilidade de sistemas. Confiabilidade de sistemas. 1ed.Porto Alegre: Sagah, 2019.

[16] SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert; VIEIRA, Daniel. Administração da produção. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018. 463 p.

[17] SOUZA, Letícia Ayala Almeida; NETO, Manoel Ferreira dos Santos; NASCIMENTO, Willem Vieira; OLIVEIRA, Ricardo. Análise Da Manutenção E Dos Modos De Falhas Operantes Em Dois Equipamentos Empregados Na Indústria De Petróleo E Gás. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, 2018.

[18] VELLOSO, Alyne de Almeida; PINHEIRO, Derlaine Brito; SILVA, Elenice Aparecida; ALMEIDA, Maria Aparecida Fernandes; NUNAN, Carolina. Modelagem e Simulação de uma Nova Linha de Produção de Rodas Locomotivas Ferroviárias: O Desafio da Ausência de Dados. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, 2018.

[19] VENANZI, Délvio; SILVA, Orlando Roque da. Introdução à engenharia de produção: conceitos e casos práticos. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

[20] XENOS, Harilaus Georgius D'Philippos. Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade. Belo Horizonte: DG, 1998. 302 p.

[21] YU, Abraham Sin Oih. Tomada de decisão nas organizações. São Paulo: Saraiva, 2011.

Capítulo 2

Análise comparativa da nova Lei 12.305/2010 com a logística reversa de embalagens de produtos químicos utilizados em plataformas

Felipe Braga Franco
Giuliana Moreti Batista
Flávio Silva Machado
Mateus Carvalho Amaral
Vanessa End de Oliveira
Maria Helena Teixeira da Silva

Resumo: Sabemos que em todo processo produtivo, principalmente os industriais, em grandes empresas do setor de petróleo e gás, além de seu produto final - que gera lucro - são gerados também um grande volume de resíduos, que antes não eram reaproveitados por acreditar-se não terem importância alguma e que o custo elevado para o reaproveitamento não fazia parte dos objetivos da empresa. Mas esses conceitos vem mudando ao longo do tempo, pois, além de obterem lucros com esses resíduos a preservação ambiental tem se tornado, atualmente, preocupação relevante para as empresas que ganham, com seu envolvimento ambiental, benefícios intangíveis para sua reputação e imagem. Aliado a essa iniciativa das empresas e pelo controle mais rigoroso dos órgãos responsáveis representado pela lei 12.305 sancionada em agosto de 2010, traz novos e rigorosos padrões, exigindo que todos na cadeia produtiva sejam corresponsável pelo correto descarte e tratamento destes materiais, criando assim a responsabilidade compartilhada. Além disso, criam-se mais oportunidades de negócios, como as cooperativas que poderão participar no processo de tratamento destes materiais, gerando assim, benefícios tanto econômicos quanto sociais.

Palavras-Chave: Lei 12.305/2010, Responsabilidade Compartilhada, Tratamento de Resíduos, Cooperativas, Logística Reversa, Logística reversa de pós-consumo.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas ocorreu um crescimento da preocupação com a gestão ambiental, levando empresas e governantes com visão estratégica variada aparecerem, visando o equacionamento de ações que amenizem os efeitos mais visíveis dos diversos tipos de poluição ambiental, protegendo a sociedade e seus interesses. Desta forma, além das possíveis oportunidades econômicas oriundas dos programas de recuperação ambiental, a questão da preservação ambiental direcionará esforços das empresas no sentido de sustentar sua imagem corporativa. Quanto às sociedades, estas se resguardarão através de legislações e regulamentações específicas, juntamente com a conscientização ecológica, através da educação ambiental em todos os níveis de ensino.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa para o tratamento ou destinação dos resíduos sólidos, especificamente embalagens de produtos químicos utilizados na extração de petróleo em plataformas, respeitando as diretrizes da lei12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

2. OBJETIVOS E DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente trabalho se classifica como um estudo analítica de caso único, portanto será estudada apenas uma organização, e contará com uma pesquisa analítica, estudando a problematização e propondo o desenvolvimento de uma nova proposta.

Ele abordará a importância da adequação a Lei nº 12.305, por parte da empresa "A", empresa petrolífera instalada no município de Macaé, Rio de Janeiro. A lei é aplicada a todos os segmentos industriais, porém o presente trabalho será delimitado ao retorno de contentores de produtos químicos oriundos de plataformas de produção de petróleo.

Possui como objetivo fazer um mapeamento do fluxo da logística reversa dos contentores de produtos químicos e verificar a adequação deste processo a lei. Será analisado, também, o aprimoramento no tratamento e descarte final das embalagens a fim de gerar ganhos econômicos e sociais com este processo.

Além do mais, estuda a possibilidade da criação de uma empresa de descontaminação das embalagens retornáveis para que possam voltar ao mercado sem nenhuma restrição em sua utilização.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. MERCADO PETROLÍFERO MUNDIAL

Apesar do esforço científico desempenhado nas últimas décadas buscando fontes alternativas de energia, ainda não foi encontrado substituto à extração e beneficiamento do petróleo. Portanto, mantem-se a dependência do setor industrial ao petróleo e seus derivados para mover a cadeia logística.

A política mundial referente ao petróleo revela-se uma peça estratégicacomplexa, com mais de 60% das reservas mundiais concentradas no Golfo Pérsico. Ainda, temos o aumento do consumo mundial de combustíveis nos países desenvolvidos e problemas ambientais decorrentes de toda a cadeia produtiva do petróleo (GOLDEMBERG, 1998).

Para simplificar a problemática da indústria do petróleo temos que considerar que sua cadeia produtiva apresenta características peculiares, seus custos de produção variam em função de fatores geo-econômicos e geológicos de cada região produtora. Ainda, além do custo técnico de produção, o custo do petróleo seu conta comtributos, tais como: royalties, imposto sobre lucros excepcionais, passivos ambientais, participações especiais, etc. Esses impostos arrecadados são fontes importantes de receita fiscal nos países em desenvolvimento, como o Brasil (BRUNI, 2007).

3.2. PLATAFORMAS

Existem dois tipos principais de plataformas de extração de petróleo em alto mar: perfuração e produção.

Nas de perfuração busca-se o óleo em poços ainda não explorados, que tem início com pesquisas geológicas e geofísicas que localizam bacias promissoras e analisam os melhores pontos para sua perfuração.

As plataformas de produção extraem o petróleo localizado no fundo do mar, levando-o à superfície, onde o

óleo é separado de outros compostos, como água e gás. Dependendo da profundidade do poço, podem ser construídos dois tipos de plataforma de produção: fixas (águas rasas, até 180 metros) ou flutuantes (locais profundos).

3.3. REFINARIAS

O processamento de petróleo em refinarias varia conforme a sua localização, esta justificada pela: demanda do mercado consumidor local e externo, vias de distribuição, características do petróleo que abastece a refinaria e custo de implantação do processo. Na refinaria é processado um grande volume de petróleo, acarretando um grande volume de resíduos gerados além de altas taxas de emissões de poluentes, o que exige um controle acurado do processo (LIMA, 2002).

Os poluentes emitidos no processo sejam emanações, efluentes ou resíduos, são muitos e apresentam uma ampla faixa de variação em função de características pontuais do processo. As emissões atmosféricas provenientes das refinarias incluem emissões fugitivas dos compostos voláteis presentes no óleo cru e nas suas frações, as emissões geradas pela queima de combustíveis nos aquecedores de processo e nas caldeiras, e as emissões das unidades de processo propriamente ditas. Os efluentes líquidos consistem em águas de resfriamento e águas de processo. Por fim, os resíduos sólidos tipicamente gerados na indústria de refino de petróleo incluem lama dos separadores de água e óleo, lama dos flotadores a ar dissolvido e a ar induzido, os sedimentos do fundo dos tanques de armazenamento do petróleo cru e derivados, borras oleosas, argilas de tratamento, lamas biológicas, lamas da limpeza dos trocadores de calor e das torres de refrigeração, além de sólidos emulsionados em óleo. Os resíduos gerados durante as operações de refino variam muito na sua composição e toxicidade. Suas características dependem do processo produtivo que os gera, assim como do tipo de petróleo processado e dos derivados produzidos (KINDINGER e UGAYA, 2002).

Estima-se que para cada barril de petróleo extraído são emitidos cerca de 436 kg de CO_2 (LABJOR, 2006), o que faz com que a indústria de petróleo seja conhecida como uma das maiores emissoras de dióxido de carbono na atmosfera. Além disso, a queima de combustível de origem fóssil é a maior fonte de emissão antropogênica de CO_2, perdendo para outras atividades industriais e para a produção de cimento. (IPCC, 2000).

Diante dos inúmeros impactos ambientais causados pela extração de petróleo, as empresas do setor têm investido maciçamente na minimização dos impactos ambientais causados pela extração do petróleo: ao tratar os poluentes e os resíduos gerados (LIMA, 2002); no sequestro geológico de carbono (LABJOR, 2006); e, ainda no desenvolvimento de energias que possam, mesmo em pequena escala, substituir o uso do combustível fóssil em algumas aplicações.

3.4. LOGÍSTICA REVERSA DE PÓS-CONSUMO

Como ferramenta gerencial, a logística reversa permite buscar meios para que uma parcela dos produtos ou seus materiais constituintes sejam reaproveitados, reutilizados, reciclados e comercializados, de alguma forma, após o seu descarte (LEITE, 2007). Desta forma, os resíduos reaproveitáveis retornam a sua forma original de modo eficiente e com baixo custo, podendo ser reciclados sob as mais diversas formas.

Segundo Leite (2003), os resíduos industriais têm características próprias na formação dos canais de distribuição reversos, pois também envolvem elementos da logística aplicada.

Este ciclo reverso passa a ser importante à medida que pode gerar novas empresas de serviços, onde o ciclo deixará de ser reverso e passará a ser direto. A empresa possui a matéria-prima que é o resíduo, o processo produtivo que consiste na transformação deste resíduo através de reciclagem, compostagem ou outro processo gerador de energia, e o produto final, que normalmente será matéria-prima para outras empresas (PHILIPPI, 2006).

A logística reversa de pós-consumo busca equacionar a relação entre o fluxo físico e as informações correspondentes aos bens de consumo descartados pela sociedade. Seja no final de sua vida útil ou apenas usados, passíveis de reutilização. Neste método podemos destacar dois subsistemas: canais reversos de reuso e canais reversos de reciclagem, a qual se refere o presente trabalho.

A classificação dos bens de utilidades refere-se à duração de sua vida útil, na medida em que a preocupação principal da logística reversa é o equacionamento dos processos e caminhos percorridos por

esses bens ou por seus materiais constituintes após o término de sua vida útil. Esses bens ou seus materiais constituintes transformam-se em produtos denominados de pós-consumo e podem ser enviados a destinos finais tradicionais, como a incineração e os aterros sanitários, ou retornar ao ciclo produtivo por meio dos canais de desmanche, reciclagem ou reuso em uma extensão de sua vida útil. Essas alternativas de retorno ao ciclo produtivo constituem-se na principal preocupação do estudo da logística reversa e dos canais de distribuição reversos do pós-consumo (LEITE,2003).

3.5. RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a ABNT (2004), a classificação dos resíduos sólidos obedece às seguintes características: origem, periculosidade e a responsabilidade pelo gerenciamento dos resíduos.

Na extração de petróleo diferentes produtos químicos são utilizados na linha de produção. De acordo com dados fornecidos pela empresa A, aquantidade média de produtos químicos utilizados na produção de um barril de petróleo é de 4,1 kg, de diferentes composições e fabricantes.

Na gestão de resíduos sólidos, a seguinte ordem de prioridade deve ser observada: geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

O descarte incorreto de certos materiais gera impactos tanto ambientais quanto aos relacionados à imagem e reputação das empresas que os inutilizam de forma incorreta. Para uma empresa ser sustentável nos dias de hoje, é preciso que ela trabalhe conforme os princípios do economicamente viável, socialmente responsável e ambientalmente legal.

3.6. RESPONSABILIDADE COMPARTILHADA

Pela Lei 12.305/2010 foi instituída a responsabilidadecompartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individual e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores/comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoante as atribuições e procedimentos previstos (BRASIL, 2010).

Assim, cabe aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes dos produtos a tomar todas as medidas necessárias para assegurar a implementação e a operacionalização do sistema de logística reversa sob seu encargo. Os consumidores deverão efetuar a devolução após o uso, aos comerciantes ou distribuidores, dos produtos e das embalagens, objetivo principal da logística reversa. Os fabricantes e os importadores darão destinação ambientalmente adequada aos produtos e às embalagens reunidos ou devolvidos, sendo o rejeito encaminhado para a disposição final ambientalmente adequada.

3.7. COOPERATIVAS

A regulamentação da Lei 5.764/71 é um marco para a criação disciplinada de cooperativas no Brasil. As atividades desenvolvidas por cooperativas, sejam elas de quaisquer ramos ou finalidades, são reguladas pela referida lei (INDRIUNAS, 2010).

Zanotti (2011) afirma que cooperativas de trabalho foram criadas com o objetivo explícito de trazer melhores condições para seus cooperados, tanto no que se refere a melhoria de condições econômicas quanto decondições gerais de trabalho; sendo assim uma alternativa ao estilo de vida dos trabalhadores, possibilitando a melhoria da qualidadede vida dos mesmos (CORNFOTH, 2004).

Dados da OCB (2010) apontam que as cooperativas de trabalhosão aproximadamente 1.400 organizações, que empregam diretamente 4.250pessoas com um número de associados que ultrapassa 260.800.

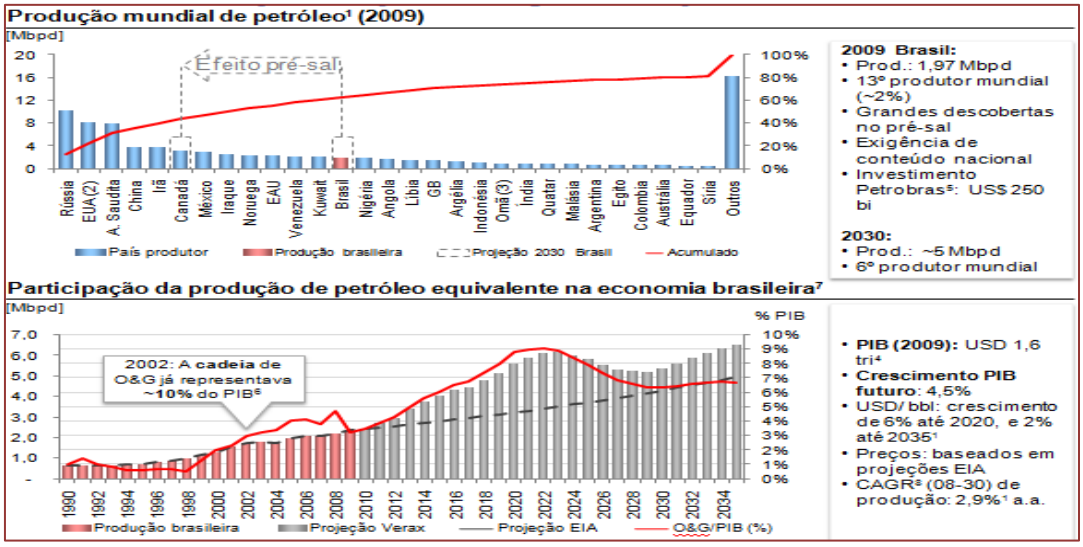
A globalização, o aumento da tecnologia e a mecanização do trabalho são vistas por Bizerra (2008) como elementos que proporcionam uma resposta via cooperativa, por possuir elementos para a geração de empregos cumprindo seu objetivo social de valorização do homematravés do trabalho produtivo.

Essas cooperativas são amplamente utilizadas como terceirização de mão de obra. Segundo Amaral (2008), são permitidos trabalhos terceirizados por cooperativas nas chamadas atividades–meio, desde que ausentes os pressupostos de subordinação e de pessoalidade, sendo vedada a utilização em atividades-fim na forma de prestação de serviços.

3.7.1. MOTIVAÇÃO PARA CRIAÇÃO DE UMA COOPERATIVA

Com a descoberta do Pré-sal na Bacia de Santos há uma grande perspectiva em relação ao mercado de petróleo no Brasil. Segundo (VERAX CONSULTORIA, 2011), o país deve se tornar o 6° produtor mundial até 2030, chegando a produzir 5 mbpd, e a produção deve passar dos atuais 3% para 7% do PIB em 2035 (Ilustração 1). A Petrobras, que representa 95% deste mercado, possui investimentos planejados da ordem de U$$ 250 bi.

ILUSTRAÇÃO 1 - Produção mundial de petróleo e participação da produção de petróleo equivalente na economia brasileira



Fonte: Verax Consultoria

Os dados da Verax mostram que o mercado de tratamento de resíduos industriais sofrerá franca expansão. Ainda, como o custo da destinação final destes resíduos é elevado, empresas tendem a buscar parceiros visando cumprir a legislação e ter ganhos financeiros nestas operações.

Outro benefício seria a geração de empregos e renda para milhares de famílias da região. Em entrevista, o diretor da Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP), Walter Capello Júnior, afirma que a lei de resíduos sólidos, pode gerar milhões de empregos. Os benefícios podem ser percebidos ainda antes do previsto caso o governo federal promova incentivos fiscais e tributários para estimular as empresas a investirem em cooperativas, como consta na lei (DIÁRIO DO VALE, 2011).

4. PROCESSOS LOGÍSTICOS E DE RECONDICIONAMENTO DOS MATERIAIS

Uma unidade de produção é constituída de sondas, barcos especiais e suporte técnico de engenharia de poço e engenharia submarina.

A plataforma é uma unidade de processamento, pois capta o petróleo *in natura* (associado com gás natural, água e impurezas), faz o processamento primário deste, transfere o gás e óleo já processados para navios e/ou terminais, trata e descarta a água produzida, além de descartar os resíduos gerados. Para melhor desempenho operacional dos equipamentos de produção, as unidades são equipadas com um sistema de injeção de produtos químicos.

A unidade de injeção de produtos químicos, para óleo e gás, abastecerá o processo com desemulsificantes, antiespumantes, inibidor de incrustação, inibidor de corrosão para gás, inibidor de hidrato para gás e polieletrólito (tratamento de água oleosa produzida). Já no tratamento de água, abastecerá o sistema com sequestrante de oxigênio, biocida e biodispersante. São utilizados também diversos lubrificantes nos equipamentos que dão apoio à produção. As embalagens dos produtos químicos citados acima retornam para serem tratados e reutilizadas pela empresa.

4.1. HISTÓRICO DA EMPRESA B

A empresa de recondicionamento de tambores e bombonas, denominada neste estudo como empresa "B", localiza-se no município de Duque de Caxias, Rio de Janeiro. Ela recebe os materiais, promove sua limpeza e adequação para serem reutilizados.A produtividade média diária da empresa é de 350 tambores e 300 bombonas. A empresa trabalha com 50 funcionários em regime de 8 horas diárias, que pode ser complementado com horas extras. Para que haja um condicionamento operacional, a empresa processa em dias diferentes tambores e bombonas.

A empresa B possui diversos clientes, porém a empresa A corresponde a 50% de sua produção. O processamento do material é feito sem distinção dos clientes, separando apenas por pedido e status de atendimento, emergêncial ou normal.

Das 300 bombonas recebidas diariamente na empresa, 10% são descartadas por não apresentarem condições de reaproveitamento. Esse material descartado representa uma oportunidade sócio-ambiental, pois através de cooperativas locais esse material poderia ser processado e revendido para diferentes setores industriais.

5. MODELO DE CRIAÇÃO DA COOPERATIVA

O presente trabalho identificou a oportunidade de se criar uma cooperativa de trabalho que possa reaproveitar os resíduos não reaproveitáveis, gerados pela empresa B. Assim, levantou-se a possibilidade de visitar uma empresa que desenvolve atividades similares como modelo. A empresa selecionada foi a Recicle Ambiental LTDA, situada na cidade Caratinga, Minas Gerais, funcionando há dez anos no segmento de reciclagem de materiais.

A visita à Recicle possibilitou o conhecimento mais específico e detalhado sobre o processo de reaproveitamento de materiais, reforçando a idéia da criação da cooperativa para reciclagem dos resíduos sólidos descartados pela indústria de petróleo e gás.

Estimando com base no volume médio de 300 t/mês, sem distinção de percentual de cada material, a Recicle, tem um lucro mensal de R$ 70 mil, custos operacionais de R$ 42 mil, custos fixos de R$ 15 mil (inclui energia elétrica, água e os salários de 14 funcionários) e o custo de entrega do produto, que gira em torno de R$ 1,5 mil.

Para efetuar os procedimentos de reciclagem são necessários os seguintes equipamentos: cinco caminhões, quatro prensas e dois elevadores. A coleta do material a ser reciclado é feito em um raio de 100 km do município de Caratinga.

O processo utilizado pela empresa na reciclagem do material coletado passa pelos seguintes processos: coleta, separação, triagem, prensagem e entrega. Primeiramente, o material é coletado pela própria empresa ou doado, em seguida ele é classificado em: papelão, plástico ou sucata metálica. Após separados por classe, os materiais a serem reciclados passam por uma triagem que os classificam como: ferro velho (sucata metálica leve ou pesada) ou sucata fina (inclui: cobre, alumínio, chumbo, aço inoxidável, magnésio e plástico). Depois deste processo, é feita a prensagem criando-se blocos dos materiais citados que são organizados em pilhas para serem despachados. Assim, os produtos já estão prontos para serem enviados às empresas especializadas.

Conforme foi discutido no capítulo 4, as bombonas que não podem ser reutilizadas no processo devem ser descartados pela empresa de reciclagem B, gerando, desta forma, a demanda necessária para a criação de uma cooperativa de trabalho. Tal iniciativa gera tanto o reaproveitamento dos materiais que a principio seriam descartados como o beneficio social da geração de emprego e renda para vários cooperados.

A região para criação da cooperativa de trabalho seria no Bairro Jardim Gramacho, em Duque de Caxias (RJ). Esta região conta com uma população de 818.432 habitantes, segundo o último censo do IBGE (2010). Os principais motivos para a escolha desse bairro se deve ao fato da região encontrar-se próxima aempresa B, além de gerar benefícios sociais para a população.

A possibilidade de criação de novos empregos em uma área com dificuldade de acesso ao mercado de trabalho torna a criação da cooperativa ainda mais atraente. Em um primeiro momento, como a proposta se baseia na empresa de reciclagem citada, ainda não se pode precisar o faturamento, bem como o quantitativo de empregos.

5.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS PARA CRIAÇÃO DA COOPERATIVA DE TRABALHO

Para montagem da cooperativa será necessário dois galpões de armazenagem, um com aproximadamente 4.000 m² para o processo de reciclagem e outro com 2.000 m² para o armazenamento do produto final. Para o desenvolvimento dos trabalhos serão necessários equipamentos, tais como: serrafita, moinho, lavadora mecanizada e secadora.

Tabela 6: Custo dos equipamentos

Equipamento	Valor de Aquisição
Serrafita	R$ 10.000,00
Moinho	R$ 17.000,00
Lavadora	R$ 13.000,00
Secadora	R$ 20.000,00

Fonte: tabela confeccionada pelo autor com dados estimados da pesquisa da Recicle Ambiental LTDA.

5.2. PROCEDIMENTOS DE TRABALHO

Os materiais impróprios para reaproveitamento pela empresa B serão enviados à cooperativa, separados e prensados. O processo de reciclagem dos materiais começa na serra fita que corta as bombonas em pequenos pedaços. Em seguida, o material cortado será encaminhado ao moinho, onde será triturado em pedaços bem pequenos. Após a moagem o material será lavado, devido aspartículas muito finas do próprio material que o impregnam. Após a lavagem, o material então será secado e armazenado. Por fim, o material estará pronto para ser comercializado.

5.3. FUNCIONAMENTO DA COOPERATIVA

Em relação à viabilidade econômica desta cooperativa pode-se destacar que os estados e municípios terão um papel importante na estruturação da mesma, ou seja, disponibilizando o local onde será instalada, bem como sua infraestutura, equipamentos necessários, facilidade de financiamento e demais incentivos que estão previstos no artigo 8, 16 e 18, inciso 4 da lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010).

6. CONCLUSÃO

O presente projeto se propôs a descrever o fluxo logístico de embarque dos produtos químicos e o processo reverso executado pela empresa A, mostrando que a referida empresa controlava o retorno de seus resíduos até a terra e dispunha de um local apropriado para seu armazenamento até a próxima etapa. Sendo assim, inicialmente propomos a criação de uma empresa para tratar esses resíduos, que se constituem principalmente de bombonas e tambores que retornam das plataformas. Foi constatado que a empresa B já realizava este processo de tratamento dos resíduos, para que após o processo de descontaminação das embalagens, a própria empresa A, em um processo de parceria, comprasse novamente os materiais que seriam, posteriormente, reutilizados.

Pelos estudos realizados, precebeu-se que no processo da empresa B, nem todas as embalagens eram adequadas para serem lavadas e reaproveitadas – segundo estimativas, aproximadamente 10% das embalagens eram descartadas - sendo assim surgiu a oportunidade de gerar ganhos socioeconômicos com estas embalagens não aproveitadas. Para tal, foi proposta a criação de uma cooperativa, o que vai ao encontro do que é exigido e apoiado pela lei 12.305/2010, e que inclusive prevê apoio e recursos para que iniciativas como esta sejam formalizadas e incentivadas.

No que se refere a cooperativa ela se mostra uma importante ferramenta de solução para a destinação final dos materiais, visto que muitas empresas não possuem interesse em realizar estes serviços. Ainda, há a pressão da sociedade para que tais empresas criem soluções para o descarte correto de tais produtos, minimizando assim, os impactos e danos ambientais.

Para a criação da cooperativa deverão ser investidos aproximadamente R$60.000,00 em equipamentos, mais o aluguel de uma área para instalação do galpão de operação. Com relação a área de instalação da cooperativa, a prefeitura do município de Duque de Caxias poderá ceder o espaço através de uma parceria

com os cooperados.

Devido a pequena quantidade de material processado pela cooperativa, aproximadamente 5000,00 kg/mês, sua viabilidade econômica torna-se inalcançável, considerando apenas o descarte da empresa B. Essa condição de inviabilidade econômica pode ser revertida através de incentivos econômicos das empresas A e B mais parcerias com outras empresas do setor petrolífero que possuem a necessidade de promover a reciclagem de materiais plásticos. Esses parceiros da cooperativa além de estarem cumprindo asdeterminações da Lei 12.305/2010, estarão também obtendo ganhos socioambientais.

Considerando a questão inicial do projeto, a empresa A esta cumprindo a Lei 12.305, encontrando-se dentro dos padrões exigidos pela lei. Além disso, se levar em consideração a criação da cooperativa, a empresa A estará praticando também a chamada responsabilidade compartilhada com seus parceiros. O local destinado para instalação da cooperativa será outro fator socialmente positivo, pois trará benefícios através da geração de emprego e renda para a comunidade.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. (NBR 10004).

[2] AMARAL, Líris Silvia Zoega T. do. Cooperativa de trabalho. Jus Navigandi, Teresina, ano 7, n. 58, 1 ago.2002. Disponível em: <http://jus.uol.com.br/revista/texto/3138>. Acesso em: 15 mar. 2011.

[3] BIZERRA, Maria Salete da Silva. Cooperativa de Trabalho: Saída para o Desemprego e desenvolvimento econômico. Disponível em: <http://www.uniesp.edu.br/revista/revista6/pdf/22.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2011.

[4] BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010.

[5] BRUNI, P. B. - Petrobrás: Estratégia e esforço tecnológico para alavancar competitividade, análise da conjuntura das indústrias do petróleo e do gás. Disponível em: http://www.ie.ufrj.br/infopetro/pdfs/petrogas mar2007.pdf.

[6] CORNFORTH, Chris The governance of cooperatives and mutual associations: a paradox perspective in Annals of Public and Cooperative Economics, 75(1), 2004.

[7] DIÁRIO DO VALE. Volta Redonda, 23 maio 2011. Disponível em: <http://diariodovale.uol.com.br/>. Acesso em: 24 maio 2011.

[8] GOLDEMBERG, J. – Energia, meio ambiente & desenvolvimento. São Paulo: Edusp, 1998.

[9] INDRIUNAS, Luís. Como funcionam as cooperativas no Brasil. Disponível em: <http://contavel.com/index.php?page=cooperativas>. Acesso em: 04 mar. 2011.

[10] IBGE. Censo 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 27 maio 2011.

[11] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change – Special Report on Emissions Scenarios. Cap. 5.3. 2000. Cambridge University Press, UK. Disponível em http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/116.htm. Acessado em: 10 abr. 2011.

[12] KINDINGER, D.L.; UGAYA, C.M.L. II Encontro dos programas de recursos humanos em petróleo e gás natural do Paraná ANP/CEFET-PR/UFPR, 2002.

[13] LABJOR – Laboratório de Estudos Avançados em Jornalismo. O Resultado Econômico e ambiental de armazenar CO2 em reservatórios de petróleo. 18 de junho de 2007.

[14] LEITE, P. R. Logística Reversa: meio ambiente e competitividade. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

[15] LEITE, P. R. O papel da logística reversa e a competição nos canais reversos de remanufatura automotiva. Anais do X Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais. SIMPOI/POMS, Rio de Janeiro, agosto de 2007.

[16] LIMA, H.R.P. – Fundamentos de Perfuração - Petrobras/Serec/Cen-Nor, Salvador, 2002

[17] ORGANIZAÇÃO DAS COOPERATIVAS BRASILEIRAS (OCB). Disponível em: <http://www.brasilcooperativo.coop.br>. Acesso em: 03 mar. 2011

[18] PHILIPPI Jr., A. & AGUIAR, A.O. - Resíduos sólidos: Características e Gerenciamento. In: PHILIPPI Jr.,Arlindo (Ed.). Saneamento, saúde e ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável. Barueri,2006.

[19] VERAX CONSULTORIA. Disponível em:<www.veraxc.com>. Acesso em: 10 mar. 2011

[20] ZANOTTI, Lawrence Lubiana. COOPERATIVAS DE TRABALHO. Disponível em: . Acesso em: 10 mar. 2011.

Capítulo 3

Reciclagem de resíduos sólidos têxteis: Proposta de fabricação de tecido de malha, utilizando como matéria-prima aparas de tecidos, malhas e nãotecidos descartadas pelas indústrias de confecções de Ibitinga

Regina Aparecida Sanches
Rafael Bastos Rocha
Adriana Yumi Sato Duarte

Resumo: A reciclagem de materiais têxteis pode ser entendida como o reprocessamento de resíduos descartados pelas indústrias da cadeia têxtil e de confecções (pré-consumo) e pelos consumidores após o uso (pós-consumo) com a finalidade de produção de novos produtos. O presente artigo tem como objetivo desenvolver um tecido de malha com composição 50% poliéster/50% viscose, utilizando como matérias-primas fibras de poliéster oriundas de aparas de tecidos, de malhas e de tecidos nãotecidos (enchimentos) descartadas pelas indústrias de confecção da cidade de Ibitinga (São Paulo, Brasil) e de fibras de viscose virgem adquiridas no mercado. A rota de reciclagem escolhida foi a desfibragem. As fibras recicladas foram transformadas em fios pelo processo de fiação convencional (de anéis). Os tecidos de malha foram produzidos em máquina circular de pequeno diâmetro. O estudo mostrou que existe viabilidade na fabricação de tecidos utilizando como matérias-primas desfibradas de poliéster e fibras de viscose virgem.

Palavras-chave: Tecido de malha. Gestão de Resíduos. Reciclagem têxtil.

1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da indústria têxtil e de confecções é uma das mais importantes, extensas e complexas existentes, envolve diversos segmentos industriais autônomos cuja interação é fundamental para sua organização. A cadeia brasileira, com mais de 200 anos de história, tem enorme importância econômica e social, emprega 1,7 milhão de pessoas em mais de 27 mil empresas em atividade (FIESP, 2019).

O Brasil, maior cadeia do Ocidente, responde por 2,4% da produção mundial de têxteis, por 2,6% da produção mundial de vestuário, possui a quinta maior indústria têxtil do mundo, é o quarto maior produtor de artigos confeccionados e é referência mundial em design beachwear, jeanswear, homewear, destacando-se também nos segmentos fitness e lingerie (ABIT, 2019).

Diferentemente de outras cadeias de valor agregado, essa cadeia produtiva inclui um grande número de etapas do processo, realizadas por diferentes unidades industriais sucessivas, que são responsáveis pela produção de artigos para várias aplicações, tais como, vestuários em geral, artigos para o lar e moveleiros, têxteis técnicos, médico hospitalares, nãotecidos, dentre outras (IEMI, 2019).

A cadeia têxtil e de confecções opera de forma linear, onde grandes quantidades de recursos não renováveis são extraídos para produzir os artigos finais, que, normalmente, são usados por um curto período de tempo e, em seguida, descartados pelos consumidores e enviados a aterros sanitários ou incineradas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Durante o processo fabril dos produtos têxteis, observa-se o desperdício de água, o uso de energia, o uso de produtos químicos tóxicos, o descarte de resíduos sólidos e a poluição da água (SHIRVANIMOGHADDAM et al., 2020). De acordo com Treptow (2013), somente no setor de confecções cerca 30% das matérias-primas utilizadas, em forma de aparas de tecidos, malhas e tecidos nãotecidos, oriundas das etapas de corte e de costura, são descartada como lixo.

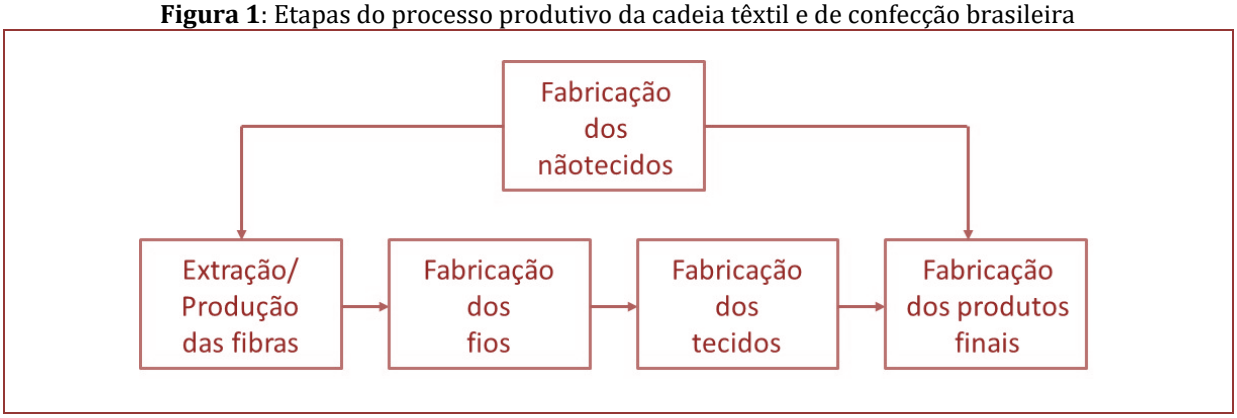
Frente ao exposto, considerando que a cadeia têxtil e de confecções brasileira provoca alto impacto ao meio ambiente, seja pela necessidade de produção de algodão, pelo elevado consumo de água, pelo descarte dos resíduos sólidos têxteis, pela demorada decomposição dos tecidos sintéticos, etc, faz-se necessário a implantação de práticas sustentáveis.

Com o propósito de minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte dos resíduos sólidos têxteis, o objetivo deste artigo é desenvolver um tecido de malha, com composição 50% poliéster/50% viscose, utilizando como matérias-primas fibras de poliéster oriundas de aparas de tecidos, de malhas e de tecidos nãotecidos (enchimentos) descartadas das indústrias de confecção da cidade de Ibitinga (São Paulo, Brasil) e de fibras de viscose virgem adquiridas no mercado.

2. PROCESSO PRODUTIVO DA CADEIA TÊXTIL E DE CONFECÇÕES

A cadeia têxtil e de confecções brasileira envolve todas as fases do ciclo produtivo, desde o fornecimento de insumos básicos (fibras têxteis) até a produção do produto ou serviço ao consumidor, cliente ou usuário final. É composta pelas seguintes etapas: (i) produção de fibra, (ii) fiação, (iii) tecelagem/malharia, (iv) beneficiamento têxtil, (v) confecção, (vi) vendas atacado/varejo, (vii) consumo e (viii) descarte (TOBLER-ROHR, 2011). As indústrias têxteis e de confecções são responsáveis pela transformação das matérias-primas (fibras têxteis) em produto final (confecção), e são divididas em várias etapas produtivas inter-relacionadas conforme ilustra a figura 1.

Figura 1: Etapas do processo produtivo da cadeia têxtil e de confecção brasileira



Fonte: Sanches, R.A. et al., (2021)

2.1. FIBRAS TÊXTEIS

O primeiro elo é o de matérias-primas, o insumo básico da indústria têxtil é a fibra ou o filamento. Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM D123-03, 2006), fibra têxtil ou filamento têxtil é um termo genérico usado para todos os materiais, naturais ou manufaturados, que formam um elemento básico têxtil, é caracterizada por ter um comprimento cem vezes maior que seu diâmetro e são utilizadas na fabricação de outros materiais têxteis, como por exemplo, os tecidos.

As fibras têxteis podem ter várias origens, e esse é o critério comumente utilizado para sua classificação. Assim, as fibras podem ser: de origem natural, se forem produzidas pela natureza, sob uma forma que as torne aptas para o processamento têxtil; ou de origem química (manufaturadas), se forem produzidas por processos industriais. As fibras manufaturadas podem ser obtidas a partir de polímeros naturais transformados por ação de reagentes químicos (fibras artificiais) ou por polímeros obtidos por sínteses químicas (fibras sintéticas) (KADOLPH; LANGFORD, 2007).

Não se sabe ao certo quando apareceram as primeiras fibras têxteis. Há milhões de anos, os homens primitivos utilizavam uma grande variedade de plantas e de vegetais em crescimento para fabricação de armadilhas, usadas para capturar animais, além de esteiras e cestas. As primeiras fibras eram feitas de materiais grosseiros, tais como: gramíneas, junco e cana, utilizados na confecção de telas, redes de pesca, tapetes, cordas, etc. Posteriormente, foram desenvolvidas técnicas para trabalhar materiais naturais mais sofisticados, como linho, pelos de animais, algodão e seda (SANCHES, 2011).

Pesquisas em lagos pré-históricos suíços mostram que o linho era fiado e tecido desde a idade da pedra. Desde 4000 a.C., os mesopotâmios conhecem a arte de fiar e tecer a lã, os produtos eram comercializados com seus vizinhos. Escavações arqueológicas no Vale de Sind, na Índia, mostram que o algodão começou a ser plantado entre 5000 e 3000 a.C. A seda foi descoberta na China em 2640 a.C. (COSTA, 2000).

No século XVII, a necessidade de se obter fibras que atendessem à crescente demanda de mercado impulsionou o início das pesquisas científicas. Em 1664, o inglês Robert Hooke publicou um estudo sobre a produção de fibras artificiais. O francês René A. F. Réaumur, em 1734, levantou a possibilidade de utilizar gomas e resinas para fabricar fibras sintéticas. Entretanto, somente em 1842 foi inventada uma máquina para a produção de filamentos de vidro (SPENCER, 2001).

As fibras manufaturadas foram desenvolvidas com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. À medida que as aplicações dos produtos finais crescem, as fibras manufaturadas vão se tornando mais necessárias, principalmente em virtude do aumento da população mundial e por reduzir a vulnerabilidade da indústria têxtil às eventuais dificuldades da produção agrícola.

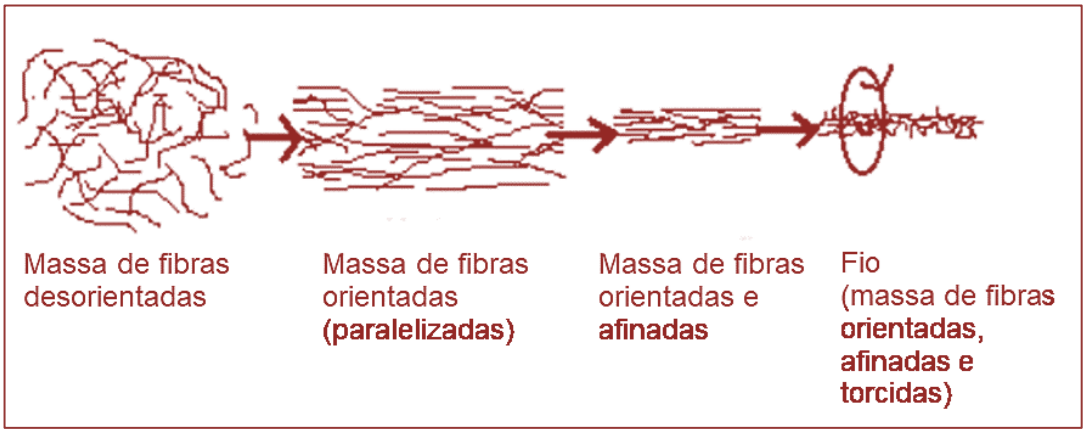
2.2. FABRICAÇÃO DOS FIOS

Os fios podem ser produzidos utilizando como matérias-primas as fibras descontínuas ou as fibras contínuas (filamentos).

2.2.1. FIOS PRODUZIDOS A PARTIR DE FIBRAS DESCONTÍNUAS

São produzidos através de um conjunto de operações que compreendem o tratamento dos diversos materiais fibrosos até a sua transformação em fio. O princípio de produção desses fios consiste em paralelizar as fibras em forma de mechas, que serão estiradas (afinadas) e torcidas para formar o fio. A figura 2 ilustra o processo.

Figura 2: Processo de fabricação dos fios utilizando como matérias-primas as fibras descontínuas



Fonte: Sanches, R.A. et al., (2021)

2.2.2. FIOS PRODUZIDOS A PARTIR DE FILAMENTOS CONTÍNUOS

Segundo Guillén (1991), as fibras químicas são fabricadas a partir de matérias-primas apropriadas, que após uma série de operações são transformadas em produtos fibrosos de maior valor comercial, os quais, por sua vez, são utilizados nas indústrias têxteis. Os vários processos de fabricação têm em comum o seguinte princípio: a matéria-prima sólida é transformada em líquido viscoso (viscoide), que pode ser realizada por dissolução em solventes apropriados, por emulsificação, ou por fusão.

Alguns processos de fabricação de fios são diretos, sendo possível a obtenção de produtos com as moléculas orientadas. Entretanto, em vários outros tipos de processos, o fio é obtido em uma forma desordenada, imprópria para o uso têxtil. Nesse caso, o fio é submetido à operação de estiragem em fases sucessivas a fim de orientar suas moléculas e lhes conferir propriedades convenientes para seu uso na indústria têxtil (DEMIR, 1997).

Segundo Kadolph e Langford (2007), os processos de obtenção dos fios químicos mais comuns são:

a) Fiação a úmido

Nesse processo o fluido a ser fiado é pressionado, através de uma bomba, a atravessar uma fieira; ao entrar em contato com um banho coagulante, endurece formando os filamentos. Esse processo é muito utilizado na obtenção do rayon viscose.

b) Fiação a seco

O polímero é filtrado e fiado, o solvente existente na solução evapora ao percorrer uma câmara onde circula ar quente. O acetato de celulose é um exemplo de fio produzido através desse processo.

c) Fiação por fusão

Esse processo é utilizado para a fiação das fibras termoplásticas, como poliamida, poliéster, polipropileno, etc. Nesse caso, a matéria-prima (chips), no estado líquido, atravessa, sob pressão, uma fieira e é solidificada na presença de ar frio.

2.3. FABRICAÇÃO DOS TECIDOS

Tecidos são superfícies têxteis formadas pelo entrelaçamento de fios ou constituídos por manta de fibras ou filamentos. Existem três tipos de tecido: tecido plano, malha e tecido nãotecido. Entretanto, as propriedades físicas dos nãotecidos restringem o seu potencial de uso final. O processo convencional de transformação de fios em tecido garante maior variedade de usos finais e pode ser feito através da tecelagem (tecido plano) ou da malharia (tecido de malha).

2.3.1. TECIDO PLANO

Tecido plano é uma estrutura produzida pelo cruzamento de um conjunto de fios de urdume (sentido longitudinal) e um conjunto de fios de trama (sentido transversal), formando ângulo de 90º (ou próximo a 90º). Os pontos de ligação são rígidos, não permitindo que os fios deslizem uns sobre os outros quando o tecido é tensionado (NBR 12546, 1991).

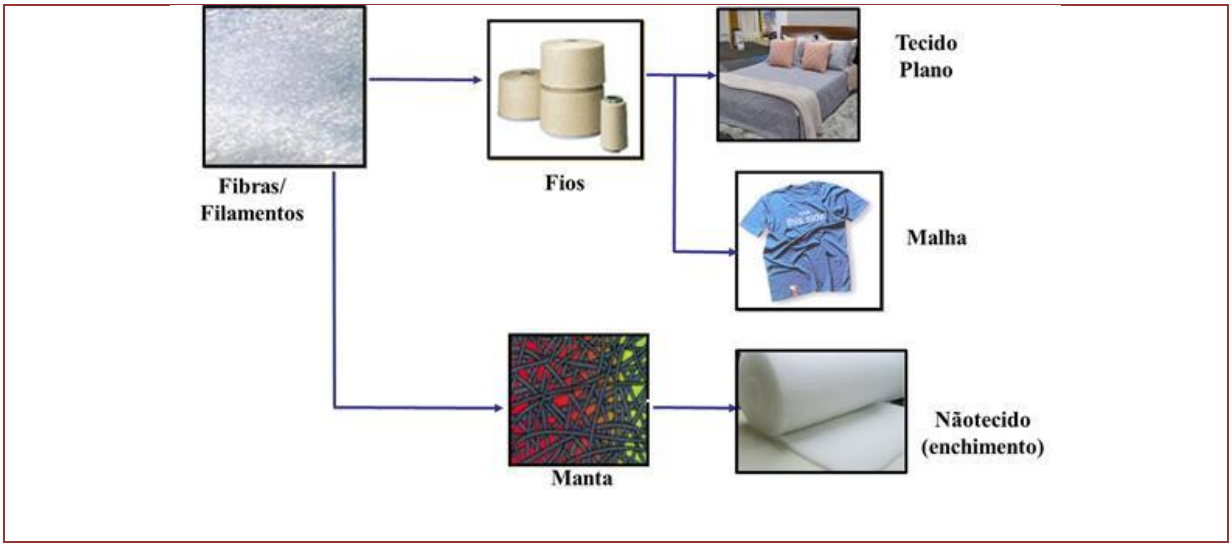
2.3.2. TECIDO DE MALHA

Os tecidos de malhas são obtidos através do entrelaçamento de laçadas (malhas), formadas pelos fios que as compõem. Os pontos de ligações são móveis, uma vez que essas laçadas podem deslizar uma sobre as outras quando o tecido é tensionado (ASTM D 3887-96, 2006).

2.3.3. TECIDO NÃOTECIDO

Tecido nãotecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou de filamentos orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidadas por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) ou combinações destes (NBR 13370, 1999). A figura 3 ilustra os processos de transformação das fibras em produto final.

Figura 3: Principais etapas do processo de fabricação de alguns artigos fabricados pelas confecções de Ibitinga.



Fonte: Sanches, R.A. et al., 2021

2.3.4. BENEFICIAMENTO DOS TECIDOS

O termo beneficiamento dos tecidos define a última etapa do processamento têxtil, engloba o conjunto de operações que os tecidos são submetidos após a fabricação dos mesmos até se tornarem aptos ao processo de confecção. Nessa etapa são realizadas operações como, tingimento, lavagem, estamparia, acabamento dentre outras, conferindo ao produto final, conforto, durabilidade e propriedades específicas.

2.4. CONFECÇÃO

A indústria de confecção, pertencente ao último elo do processo produtivo, é composta pelos segmentos de vestuário e artigos confeccionados. O segmento de vestuário engloba a produção do vestuário em geral e as classes de roupas especiais, como as de segurança, profissionais e de proteção. O segmento de artigos confeccionados é composto pela fabricação de meias, modeladores, linha lar, artigos para decoração, artigos industriais, artigos técnicos, dentre outros (SANHES, 2011).

3. IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELAS EMPRESAS DA CADEIA TÊXTIL E DE CONFECÇÕES

Os principais problemas que envolvem a sustentabilidade ambiental das empresas têxteis e de confecção durante o processo produtivo estão relacionados à poluição do solo, ar, água, uso de agrotóxicos e substância química, destinação inadequada dos resíduos sólidos e líquidos que causam impactos no meio ambiente e são prejudiciais à saúde da população (MODEFICA; FGVces; REGENERATE, 2020).

De acordo com o IEMI (2019), entre 2000 e 2018, foram consumidas 106 milhões de toneladas de fibras têxteis, houve um aumento de 77,3% no consumo, com crescimento médio de 3,4% ao ano. As fibras manufaturadas (sintéticas e artificiais) são responsáveis por 68% do consumo industrial mundial, sendo que o poliéster sozinho representa mais de 55% desse consumo, enquanto as fibras naturais representam cerca de 32% do consumo mundial.

De acordo com Lee (2009), a matéria-prima usada para a produção das fibras sintéticas é derivada de combustível fóssil, recurso não renovável. A fabricação das fibras de poliéster, por exemplo, causa os seguintes impactos ambientais: emissão de gases de efeito estufa, de metais pesados no ar e na água, de sais de cobalto e manganês, de brometo de sódio, de dióxido de titânio, de óxido de antimônio e de acetaldeído (MACHADO; LEONEL, 2014) .

Se acordo com IEMI (2019), houve uma recuperação no consumo da fibra de viscose, após um período de declínio, com previsão de até 2030 representar 8,5% do consumo têxtil industrial e com potencial para se tornar a fibra têxtil do futuro.

A fibra de viscose é uma fibra manufaturada (artificial), obtida a partir de um processo de regeneração da celulose, que pode ser retirada de diversas fontes, tais como: da polpa da madeira (como eucalipto e pinus), linter do algodão, da palha de trigo, milho ou de arroz, da polpa do bambu, entre outras (SANCHES, 2011).

O processo de produção da fibra de viscose consiste em transformar a polpa da madeira extraída de árvores, normalmente do eucalipto, em folha de celulose e depois em filamentos de rayon viscose. Na cultura do eucalipto são utilizados de 7 a 10 dos tipos de agrotóxico, dentre eles o glifosato, que é altamente tóxico e cancerígeno. Na fabricação dos filamentos de viscose são usados materiais corrosivos, como soda cáustica e ácido sulfúrico. Entretanto, a quantidade de gases de efeito estufa gerada durante o processo de fabricação das fibras de viscose é menor que quantidade desses gases emitida durante a produção das fibras de poliéster (MODEFICA; FGVces; REGENERATE, 2020).

As etapas de fabricação dos fios fabricados a partir de fibras descontínuas, dos tecidos e do beneficiamento têxtil, de modo geral, apresentam elevado consumo de energia elétrica, descarte de resíduos sólidos, consumo de água e geração de efluentes. Na etapa de beneficiamento têxtil é verificado um alto consumo de água e de geração de efluentes, a utilização de reagentes químicos e de corantes nessa etapa é responsável por um quinto da poluição industrial da água (MUTHU, 2020).

Na confecção, o consumo de energia elétrica, água e geração de efluentes é menor que nas outras etapas, o maior problema das confecções é a quantidade de resíduos sólidos têxteis produzidos durante os processos de corte e costura e que são descartadas pelas empresas em aterros sanitários ou em lixões. A decomposição dos tecidos é muito lenta, as fibras celulósicas demoram de 10 a 20 anos para se decompor e as sintéticas podem levar centenas de anos, causando impacto ambiental. Os tecidos em decomposição produzem lixiviado – líquidos resultantes de compressão da matéria dos aterros – que contamina a superfície e as fontes de água e também produzem gás metano (gás do efeito estufa), que contribui para o aquecimento global (MACHADO; LEONEL, 2014).

4. RECICLAGEM DAS APARAS DE TECIDOS, MALHAS E TECIDOS NÃOTECIDOS DESCARTADAS PELAS CONFECÇÕES

Desde a revolução industrial, o modelo de produção e consumo adotado pelas cadeias de suprimentos é realizado de maneira linear, ou seja, as matérias-primas são extraídas da natureza, transformadas em produtos e após a sua utilização são descartados. Foi um modelo bem-sucedido ao longo dos anos, mas está chegando ao seu limite, pois assume que os recursos são abundantes, disponíveis e não recuperam os resíduos gerados durante o processo de fabricação e após a vida útil do produto final.

De acordo com Echeverria et al. (2019), os resíduos têxteis são classificados em resíduos pré-consumo e resíduos pós-consumo. Os resíduos pré-consumo são gerados pelas empresas durante o processo de fabricação dos artigos e os resíduos pós-consumo são descartados pelos consumidores após vida útil dos produtos.

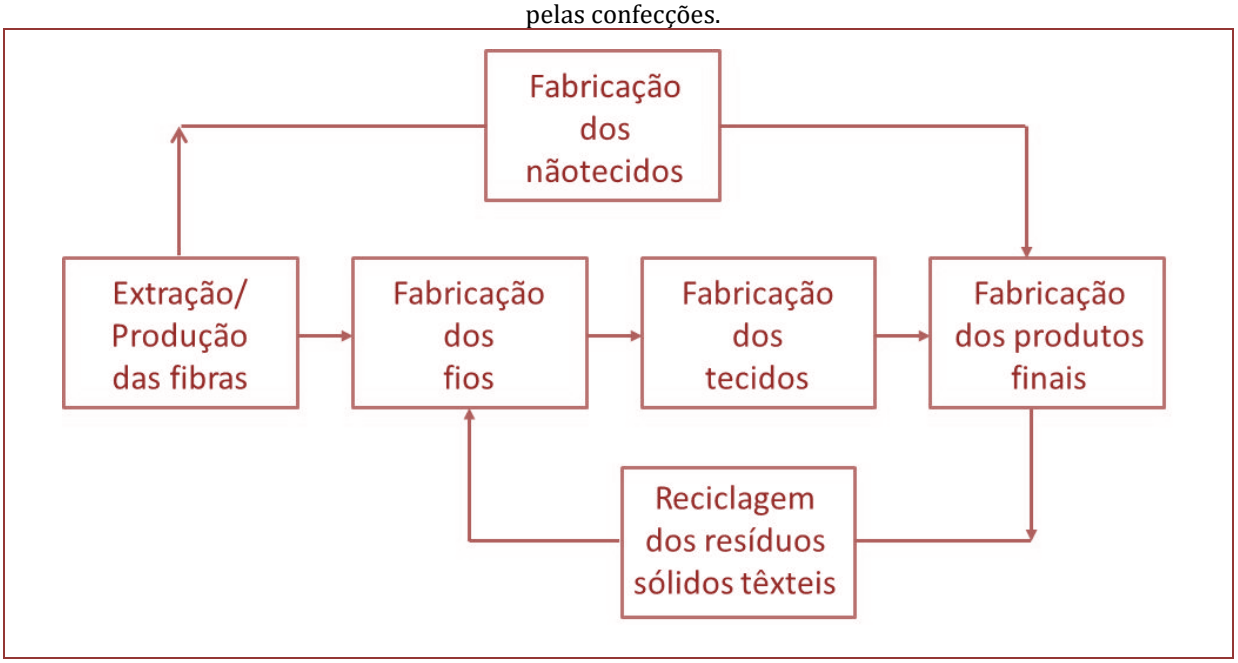
Segundo Lorenzetti (2018), 170 mil toneladas de resíduos têxteis pré-consumo são geradas pelas confecções por ano no Brasil, sendo que 60% (aproximadamente 100 mil ton) são descartadas em aterros sanitários e lixões.

As aparas de tecidos, malhas e nãotecidos descartadas pelas confecções de Ibitinga são oriundas das etapas de corte e costura e possuem pequenas dimensões. Os resíduos têxteis são descartados pelas confecções por meio de doações, venda de baixo custo, ou vão para lixões e aterros das cidades. Entretanto, possuem grande potencial de reciclagem por se tratarem de matéria-prima de qualidade, descartada sem usos antecedentes. Uma alternativa para reduzir o descarte de resíduos sólidos têxteis na cidade Ibitinga é realizar o reprocessamento dessas aparas de tecidos, dentro da economia circular, através de um processo de reciclagem.

De acordo com Piribauer e Bartl (2019), a reciclagem é o processo que visa recuperar e processar materiais residuais para transformá-los em novos produtos, materiais ou substâncias para os fins originais ou para fins diferentes dos originais. Nesse sentido, a reciclagem têxtil recupera e reaproveita produtos têxteis, pré-consumo e pós-consumo, para transformá-los em novas matérias-primas (fibras ou filamentos).

De acordo com Morseletto (2020), a economia circular pode ser definida como um modelo econômico voltado para o uso eficiente de recursos por meio da minimização de resíduos, redução de exploração de recursos primários e ciclos fechados de produtos, peças do produto e materiais dentro dos limites da proteção ambiental e benefícios socioeconômicos. Assim, o fluxo de fabricação do material têxtil original e do reprocessado foram realizados seguindo as etapas descritas na figura 4.

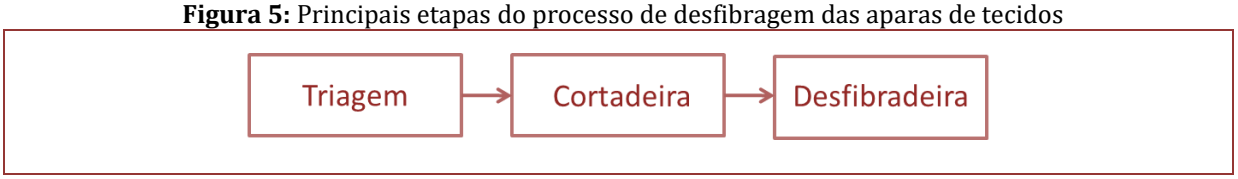
Figura 4: Principais etapas do processo produtivo da reciclagem dos resíduos pré-consumo descartados pelas confecções.



Fonte: Sanches, R.A. et al., 2021

As rotas de reciclagem envolvem processos mecânicos, químicos e térmicos. As aparas de tecidos descartadas pelas confecções de Ibitinga foram recicladas através do processo mecânico de desfibragem. As principais etapas do processo estão descritas na figura 5.

Figura 5: Principais etapas do processo de desfibragem das aparas de tecidos



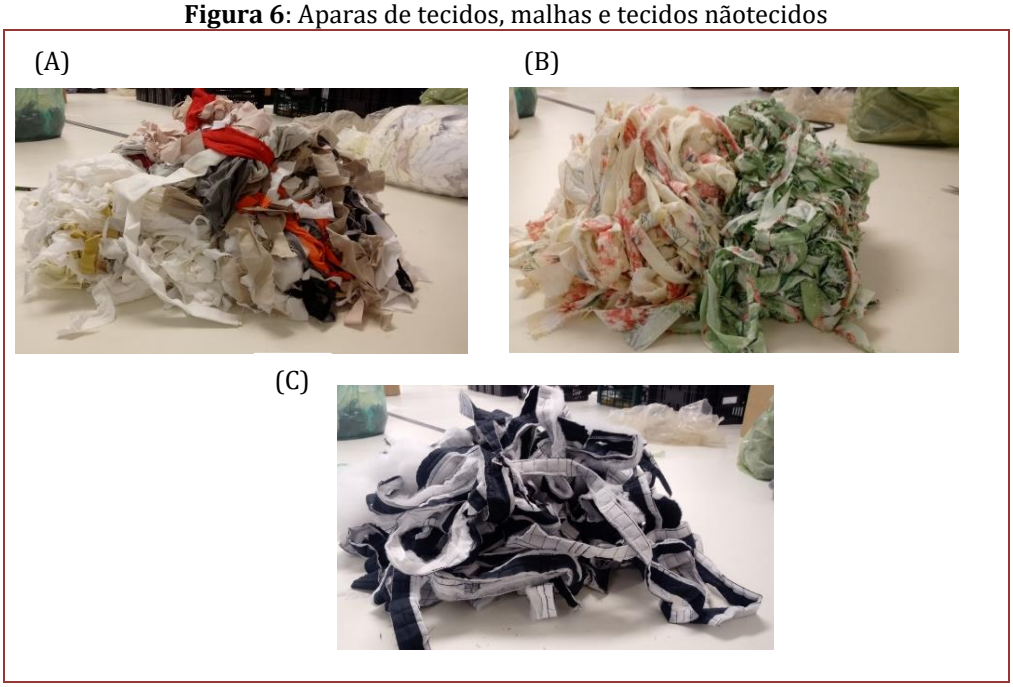
Fonte: Sanches, R.A. et al., 2021

Primeiramente foi realizada a seleção das aparas a serem desfibradas. Em seguida, os retalhos de tecidos, de malhas e tecido nãotecidos selecionados foram cortados, em uma máquina chamada cortadeira de tecidos, para uniformização do material a ser processado. O material picotado foi processado por uma máquina chamada desfibradeira e transformado em fibras desfibradas (recicladas), que posteriormente serviram de matéria-prima para a fabricação do fio desfibrado (reciclado).

5. PESQUISA EXPERIMENTAL

Foram utilizadas as seguintes matérias-primas para a fabricação dos fios: fibras desfibradas de poliéster e fibras virgens adquiridas no mercado. As fibras desfibradas, com composição 100% poliéster, foram retiradas das aparas de tecidos (figuras 6ª, 6B e 6C), de malhas (figura 6A) e de tecidos nãotecidos (figura 6C) fornecidas pelas confecções de Ibitinga.

Figura 6: Aparas de tecidos, malhas e tecidos nãotecidos



Fonte: Sanches, R.A. et al., 2021

As aparas de tecidos foram cortadas em uma cortadeira automática e desfibradas em uma desfibradeira. A figura 7 mostra o material cortado e desfibrado.

Figura 7: Aparas de tecidos, malhas e tecidos nãotecidos desfibrados

Fonte: Sanches, R.A. et al., 2021

As matérias-primas utilizadas na fabricação dos fios foram: 50% de fibras desfibradas de poliéster e 50% fibras de viscose virgem, foram fabricados fios com densidade linear 19,7x1 tex (Nec 30/1) em fiação a anel (convencional). A Figura 8A mostra a mistura utilizada na fabricação do fio (entrada da carda) e a figura 8B mostra fio produzido (saída do filatório).

Figura 8: Matéria-prima utilizada na fabricação do fio misto e o produto final

(A) (B)

Fonte: Sanches, R.A., 2021

A figura 9 mostra o tecido de malha confeccionado com o fio produzido. O tecido de malha foi fabricado utilizando um tear circular de pequeno diâmetro.

Figura 9: Tecido de malha produzido utilizando as aparas de tecidos descartadas pelas confecções de Ibitinga

Fonte: Sanches, R.A., 2021

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente preocupação com aspectos sociais e ambientais tem despertado o interesse do consumidor, que vem buscando produtos diferenciados, principalmente no que se refere à sustentabilidade. A reciclagem de resíduos têxteis pré-consumo não é uma tarefa simples, pois as empresas de confecção utilizam para a fabricação dos seus produtos, tecidos fabricados a partir de fibras de várias matérias-primas, tanto de origem naturais quanto de manufaturadas, sendo necessário a realização de uma coleta seletiva, seguida da triagem e armazenamento do material.

A rota de reciclagem escolhida mostrou-se viável para a fabricação do fio reciclado através da fiação de anéis e transformação dos fios em tecidos ou malhas para serem transformados em novos produtos como, artigos para vestuário, artigos para o lar, dentre outros.

O processo de reciclagem escolhido reduz o consumo de matérias-primas virgens, energia, água e emissão de efluentes, pois, durante o beneficiamento têxtil, elimina as etapas de preparação e tingimento dos tecidos produzidos.

As pesquisas sobre a possibilidade de aplicação dos novos produtos fabricados com fios desfibrados precisam ser aprofundadas, mas com base nos resultados preliminares é possível afirmar que este estudo contribuirá para minimizar o problema ambiental gerado pelo descarte indevido dos resíduos têxteis das confecções de Ibitinga e incrementará o crescimento econômico da região com o aumento do número de postos de trabalho e renda.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o Instituto SENAI de Inovação – Biossintéticos e Fibras (CETIQT) pela parceria para realizar em suas instalações a parte experimental desta pesquisa, ao Programa USP Municípios e ao Programa Santander Universidades que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo para o fortalecimento da pesquisa no meio acadêmico e industrial têxtil e de moda.

REFERÊNCIAS

[1] American Society for Testing and Materials, ASTM D 123-03. Standard terminology relating to textiles. West Conshohocken, 2006. 10p.

[2] American Society for Testing and Materials, ASTM D 3887-96; Standard specification for tolerances for knitted fabrics. West Conshohocken, 2006. 4p.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT. Cartilha Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira - Cenários, Desafios, Perspectivas e Demandas. Brasília/DF: [s.n.]. Disponível em: <http://abit-files.abit.org.br/site/publicacoes/cartilha.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2020.

[4] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 13370; Naotecido – Terminologia. Rio de Janeiro, 2002. 10p.

[5] Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12546; Tecidos trançados. Rio de Janeiro, 1995. 5p.

[6] COSTA, S., et al., 150 anos da indústria têxtil brasileira. Ed. SENAI-CETIQT, Rio de Janeiro, 2000.

[7] DEMIR, A., Synthetic filament yarn texturing technology. Ed. Prentice-Hall, N. Jersey, 1997.

[8] ECHEVERRIA, Claudia A.; HANDOKO, Wilson; PAHLEVANI, Farshid and SAHAJWALLA, Veena. Cascading use of textile waste for the advancement of fibre reinforced composites for building applications. Journal of Cleaner Production, v. 208. P. 1524-1536. 2019.

[9] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. 2017. Disponível em: http://www.ellenmacarthurfoundation.org/ publications. Acesso em: 25 ago 2021.

[10] FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. Panorama da indústria de transformação brasileira. São Paulo/SP. Disponível em: https://www.fiesp.com.br. Acesso em: 12 dez 2020.

[11] GUILLÉN, J.G., Fibras textiles: propiedades y descripción. Ed. UPC, Barcelona, 1991.

[12] IEMI – Instituto de Estudos e Marketing Industrial., Brasil Têxtil 2019 – Relatório setorial da indústria têxtil brasileira. IEMI, São Paulo, 2019.

[13] KADOLPH, S.J.; LANGFORD, A.L., Textiles. Prentice Hall. 10th Edition. N. Jersey, 2007.

[14] LEE, Matilda. Eco Chic: o guia de moda ética para a consumidora consciente. São Paulo: Larousse do Brasil, 2009

[15] LORENZETTI, Luiza. A importância do reaproveitamento de resíduos têxteis em São Paulo. 2018. Disponível em: https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/reaproveitamento-residuos-texteis-sp/. Acesso em 18/02/2020.

[16] MACHADO, P.G.S; LEONEL, J.N.. Práticas de reciclagem de resíduos têxteis: uma contribuição para a gestão ambiental no Brasil. Competência. v.7, n.1, 2014.

[17] MODEFICA, FGVces, REGENERATE. Fios da Moda: Perspectiva Sistêmica Para Circularidade. São Paulo, 2020.

[18] MORSELETTO, Piero. Targets for a circular economy. Resources, Conservation and Recycling. v. 153, p. 104553, 2020.

[19] MUTHU, S. S. Introduction to sustainability and the textile supply chain and its environmental impact. In: Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. [s.l.] Elsevier Ltd, 2020.

[20] PIRIBAUER, B.; BARTL, A. Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. New York: SAGE Publications, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0734242X18819277>. Acesso: 14 jan 2021.

[21] SANCHES, Regina Aparecida. Estudo comparativo das características das malhas produzidas com fibras sustentáveis para fabricação de vestuário. São Paulo, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade São Paulo. Tese de Livre-docência. 2011.

[22] SHIRVANIMOGHADDAM, Kamyar, MOTAMED, Bahareh, RAMAKRISHNAC, Seeram, & NAEBE, Minoo. Death by waste: Fashion and textile circular economy case. Science of the Total Environment, v. 718. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317.

[23] SPENCER, D. J., Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide. 3rd. Ed. Cambridge, Pensylvania, 2001.

[24] TOBLER-ROHR, M. I. Handbook of sustainable textile production. Cambridge: Woodhead, 2011.

[25] TREPTOW, Doris. Inventando Moda - Planejamento de Coleção. 5ª edição. Editora: Doris Treptow. 2013.

Capítulo 4

Uso de drone na inspeção de barragens de terra no Amazonas

José Raimundo Rabelo Filho
Maycon Douglas de Oliveira Castro

Resumo: Aplicou-se técnicas de mensuração de reservatórios de água e barragens de terra com uso de drone. Para tal, após os registros em campo, realizou-se tratamento dos dados em software para fins de identificação e condições geotécnicas e hidráulicas dessas estruturas. Com a produção de mapa-imagem georreferenciados, admite-se que o equipamento otimiza os trabalhos em campo e aumenta a confiabilidade nos resultados obtidos.

Nas inspeções de segurança buscou-se informações das características técnicas do maciço e reservatórios, identificar anomalias nas barragens e realizar imagens a fim de cadastrá-las em um sistema nacional de segurança de barragem. O trabalho foi realizado em reservatórios de água e barragens de terra consideradas de uso múltiplo, especificamente usadas na atividade de piscicultura, sendo um universo de 28 barragens, localizadas em 12 municípios no Amazonas.

Destarte, as limitações incluem uso de drone apenas em pequenos e médios reservatórios de água. Entretanto, para mensuração mais precisa de pequenas altitudes e declividades do maciço do barramento, os métodos topográficos mostram-se mais precisos.

Palavras-Chave: Barragens, anomalias, drone, ortomosaico, reservatório.

1. INTRODUÇÃO

O uso de drone no auxílio à inspeção de reservatórios e barragens de terra mostrou-se bastante vantajoso na aquisição de dados pois permite produzir um mosaico de imagens em tempo real e aprimorar as inspeções de campo. Mostrou-se como equipamento operacional que permite atingir trechos de difícil acesso, tais como: enseadas, ilhas e charcos, o que elimina o uso de embarcação e riscos à equipe, por exemplo.

Objetivo foi demonstrar resultados de inspeção superficial com uso de drone, o qual resultou em mensuração de reservatórios de água e barragens, produção de mapas-imagens e identificação de condições geotécnicas e hidráulicas das estruturas. Com GPS embarcado e câmera de alta resolução foi possível fazer o mapeamento e georreferenciamento. É ferramenta que otimizou mapear e identificar anomalias nas estruturas hidráulicas.

Segundo Vargas (1977), as primeiras barragens de terra construídas no Brasil datam do início do século XX, foram na região Nordeste, com a finalidade de dessedentação animal e irrigação, reduzindo os prejuízos provocados pelas estiagens. No Amazonas, a maioria das barragens de terra, são para abastecimento de água de uso múltiplo, especificamente usadas na atividade de piscicultura. Mas, atualmente, encontra-se proibida sua construção.

Para os autores Matos, Silva e Pruski (2013), barragem é o elemento estrutural construído transversalmente à direção do escoamento de um curso d'água, formando um reservatório artificial com a finalidade de acumular água ou elevar seu nível. Com uso do drone foi possível atingir o maior número de barragens em menor tempo possível devido a disponibilidade da prática. Esse procedimento usado pela equipe para realização das inspeções de segurança permitiu aperfeiçoar e melhorar a qualidade dos trabalhos desenvolvidos e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos. Ademais o estudo pretende contribuir com a difusão de material publicado, em virtude da escassez sobre o tema.

2. MÉTODOS OU METODOLOGIA

Os trabalhos foram realizados em reservatórios de água e barragens de terra para abastecimento de água consideradas de uso múltiplo, especificamente usadas na atividade de piscicultura, sendo um universo de 28 barragens, localizadas em 12 municípios no Amazonas.

As etapas principais foram as seguintes: Coleta dos dados em campo com os equipamentos; Tratamento dos dados com software; Produção de mapas e dimensionamento.

No levantamento das informações utilizou-se trena métrica de 50 metros que serviu para medir a largura em pontos da crista do barramento, medir a altura de monges e a distância entre a fundação até a crista, um GPS de precisão para coletar coordenadas das ombreiras da barragem e, por fim, o aerolevantamento feito pelo Drone para aerolevantamentos. Foram gerados modelos tridimensionais (3D) das barragens com resolução centimétrica, variando de acordo com a altura de voo e extraídas informações essenciais como: geração de ortomosaicos para facilitar a inspeção; espacialização para cálculo de volume; geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) de alta resolução; declividade média da barragem; e geração de mapas temáticos de alta resolução. Foi utilizado o Drone DJI PHANTO 4 PRO com GPS embarcado, incluindo uma câmera alta resolução.

Anteriormente foi realizado um planejamento de voo utilizando o aplicativo móvel DroneDeploy. A plataforma conta com suporte *online* via desktop onde foi possível fazer o planejamento, depois descarregar em um *smartphone* e enviar ao drone para fazer a missão de voo. No aplicativo acompanha-se a rota de voo e o *status* do drone como bateria, velocidade de voo, angulação da câmera, tempo estimado da missão dentre outros.

Com as imagens gerou-se o Modelo Digital de Superfície (MDS) baseado em imagens de Aeronave Remotamente Pilotada (ARP's) de asa fixa e multirrotativa (drone) e nos pontos de controle altimétricos converteu-se em Modelo Digital de Terreno (MDT). Em seguida, criou-se os mapas de alta resolução contendo: o barramento, as manchas de inundação e áreas alagadas dos reservatórios. E, por fim, os dimensionamentos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. A INSPEÇÃO DE BARRAGENS

Por que necessitamos do uso de barragens. De acordo com o ICOLD (2017), na antiguidade as barragens foram construídas para o único propósito de abastecimento ou irrigação. Mas, à medida que as civilizações desenvolveram-se, houve a necessidade de serem construídas para um propósito específico: abastecimento de água, irrigação, controle de enchentes, navegação, qualidade da água, controle de sedimentos e hidroeletricidade.

Constantemente existe a necessidade de manutenção para continuidade do bom funcionamento da barragem. Para tanto, são feitas inspeções antecipadas para avaliar os pontos e a dimensão da parte afetada. Por outro lado, os órgãos de controle de segurança de barragens têm imprimido esforços no sentido de identificar o grande número de barragens existentes no país. Nos últimos anos estão sendo realizadas campanhas de inspeções para coletar dados sobre reservatórios e barramentos a fim de disponibilizar em um sistema de segurança da barragem.

Para inspeção de barragens os dados podem ser coletados sem que ninguém seja exposto a condições perigo. Silveira (2018) afirma que há uma série de vantagens quando são usados métodos remotos para inspeção de barragens, tais como: segurança da equipe, mínima perturbação da estrutura e possibilidade de acesso virtual aos elementos estudados. Nesse sentido, acrescenta que com o avanço na tecnologia digital, câmeras, sonares e diversos outros sensores podem ser integrados aos veículos de operação remota, de modo relativamente simples, aprimorando as inspeções de campo. Junto com esta facilidade, vem, por consequência, o processamento e aquisição aprimorada de dados, que fornecem um conjunto de informações essenciais para o gerenciamento do sistema de segurança da barragem (SILVEIRA, 2018).

Para inspecionar um número grande de barragens o drone mostrou-se um equipamento perfeito para auxiliar na mensuração dos reservatórios. Sua câmera de alta precisão acoplada ao drone permite uma definição e qualidade das imagens superior às geradas por satélite. Enquanto uma imagem do espaço tem a precisão de 30 metros quadrados por pixel, no drone, cada pixel retrata cinco centímetros quadrados do terreno. Para os reservatórios, a altitude de voo ideal para o drone esteve entre 120 a 250 metros, teleguiado por controle remoto, comunicado por radiofrequência.

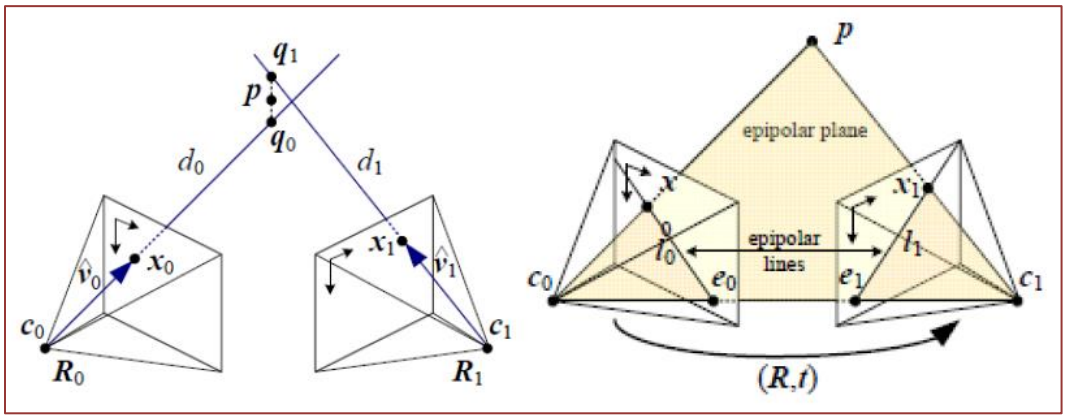
3.2. MODELO DE TERRENO DE ALTA RESOLUÇÃO E MAPAS

Segundo a ESRI (1997), modelar digitalmente uma superfície, de modo consistente, significa representar o relevo de forma a reproduzir, com exatidão, o caminho preferencial do escoamento da água superficial observado na superfície do terreno.

Para gerar um MDS é preciso aplicar a técnica conhecida como *Structure from Motion* - SfM (estrutura do movimento) e funções geométricas para calcular os dados obtidos em voo. O mapeamento a partir do imageamento com sensores embarcados em Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) fundamenta-se em conceitos da visão computacional de modelagem baseada no objeto em que o algoritmo SfM reconstrói a posição das câmeras a partir da detecção e descrição de pontos de interesse num conjunto de imagens resultando numa nuvem esparsa de pontos (FONSTAD et al., 2013, SNAVELY et al., 2008, SZELISKI, 2010).

Na etapa de triangulação, revelam os autores, o SfM calcula a localização dos pontos num sistema de referência local, criando uma nuvem esparsa de pontos 3D. A triangulação na imagem requer que sejam conhecidas as orientações interior e exterior da imagem, que é conseguida após a combinação de todas as orientações relativas, em pares, na forma de matriz fundamental. Uma matriz fundamental é a representação algébrica da geometria epipolar 3x3 que relaciona os pontos correspondentes em imagens estéreo, conforme representado na Figura 01.

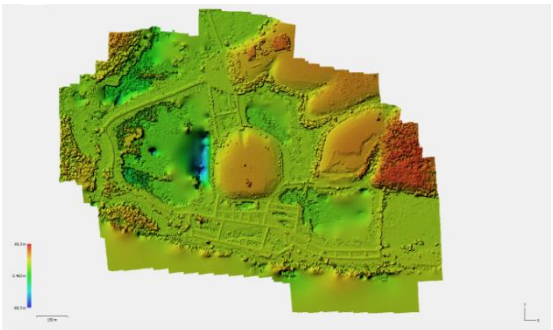
Figura 01 – Representação algébrica da geometria epipolar (Szeliski, 2010)



Após triangulação, os pares de imagem orientados na matriz fundamental são combinados para formar o bloco completo de imagens e gerar a estrutura da cena. Dessa forma, tem-se um modelo sub-otimizado porque nem todas as imagens foram sobrepostas e há discrepâncias na estrutura devido a alguns erros algébricos ocorridos na fase de medição. Para superar esse problema, a maioria dos algoritmos SfM realiza o ajustamento de blocos, *Bundle Block Adjustment*, o qual otimiza iterativamente a estrutura 3D e as matrizes de projeção de todas as imagens, simultaneamente, executando uma minimização não linear da medida real. Isto significa dizer que, numa abordagem SfM, a estrutura da cena e as matrizes da câmera são recuperadas sem o conhecimento da posição da câmera ou orientação interior (SZELISKI, 2010).

Realizado o mapeamento e estabelecidos os pontos de controle, os dados foram processados utilizando as técnicas SfM e cálculos geométricos, e, como produto, foi gerado o Modelo Digital de Superfície com cotas altimétricas de alta resolução, além de mapas feitos a partir de ortomosaicos. Para processamento e aplicação das técnicas foi necessário a utilização dos softwares AGISOFT PHOTOSCAN e ArcGis na versão 3.4 e, para transformação do MDS em MDT foi utilizado o SagaGis. A Figura 02 representa um MDS e um Mapa a partir de aerolevantamento feito em uma das barragens.

Figura 02 – MDS e Mapa de alta resolução a partir de aerolevantamento em uma das barragens. Após a coleta das imagens, elaborou-se o mosaico e o tratamento das imagens (2018)



3.3. RESULTADO DAS INSPEÇÕES COM DRONE

O tipo de barragem é para acumulação de água, onde são usadas para fins de atividade de piscicultura (criação de peixes). Não são barragens destinadas à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Todos os barramentos estão localizados em pequenos cursos d'água, conhecidos como igarapés (riachos), ou mesmo próximos de nascentes. São construídas com terra compactada (argila e/ou laterita), com tipo de estrutura em gravidade.

Todos os reservatórios de acumulação de água das barragens inspecionados possuem o volume classificado como pequeno, por serem inferiores a 5 hectômetros cúbicos (hm^3), apesar de possuírem área de espelho d'água considerável. Considerando a altura do maciço, do ponto mais baixo da fundação à crista, a maioria ficou entre 6 e 8 metros de altura, apenas uma barragem ultrapassou os 15 metros de altura. Quanto ao comprimento da crista da barragem apenas 06 ultrapassaram os 200 metros, a maioria possui entre 100 e 200 metros de comprimento. De posse dos dados que as classificou, o resultado final da avaliação resultou em Classe D, com dano potencial baixo e risco médio, conforme legislação. Assim, não foram encontradas barragens com dano potencial e risco alto.

Ficou evidenciado no sobrevoo, uma área de abrangência segura em torno de 100 ha, em virtude da autonomia de voo e outras interferências atmosféricas e topográficas, ou 300 ha com bateria reserva, conforme a barragem da Fig. 02. Enquanto que o Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant) é possível abranger áreas bem superiores.

De posse dos registros das imagens foi possível fazer o mapeamento e georreferenciamento da área em uma escala de precisão centimétrica (Fig. 03 e 04). Nas análises, além das estruturas principais de uma barragem e reservatório, foi possível identificar com uso de drone: surgência (*piping*), infiltração grande, fissura, percolação, vegetação em excesso, ravinamento, deslizamento, formação de praia, detritos (troncos e galhos de árvores).

Por outro lado, o instrumento possui limitações na identificação na barragem, tais como: deslocamento, desalinhamento, recalque, depressão, subsidência, deformação, pequenas fissuras, cavas de animais, pequenos processos erosivos, enraizamentos profundos, manutenção e detritos pequenos. Incluem-se ainda, uso de drone apenas em pequenos e médios reservatórios de água.

Para mensuração da geometria do barramento exige-se medidas mais exatas possíveis, em nível milimétrico. Tal método mais empregado fazem uso dos aparelhos topográficos (teodolito e estação total) que destinam-se fundamentalmente a medir ângulos e obter distâncias horizontais e verticais por taqueometria (BORGES, 1992). Até mesmo o uso de trena métrica e trena a laser mostraram-se bastante precisos para aquisição destas medidas.

Não podemos deixar de frisar que as inspeções visuais e a instrumentação de barragens são formas essenciais no monitoramento constante, de tal forma que o drone vem complementar as inspeções visuais, realizadas a partir da superfície.

Figura 3 - Imagem gerada pelo drone para interpretação de anomalias na barragem e medição do reservatório de água. Esta possui 70 m de comprimento com 6 m de altura. À esquerda o reservatório de 0,018 hm^3 e a ensecadeira submersa

Figura 4 - Mapa imagem da barragem e o reservatório de água. Um dos produtos finais gerados com uso de drone. No detalhe, o operador segurando o iPhone, o controle e o drone

4. CONCLUSÕES

A mensuração de pequenos e médios reservatórios de água mostrou-se perfeitamente recomendável com uso de drone. Após a coleta e tratamento das imagens foi possível calcular a área e desenhar a poligonal do reservatório, inclusive acompanhar mudanças ao longo do tempo. Permite ainda atingir trechos de difícil acesso, tais como: terrenos íngremes, enseadas, ilhas e charcos, o que elimina o uso de embarcação ou percorrer trechos em veículos. Ademais, com uso do drone foi possível atingir o maior número de barragens em menor tempo possível, reduzir custos e melhorar a segurança na execução, garantindo a qualidade e precisão dos dados levantados.

Todavia, denotam-se limitações na mensuração da geometria do barramento, para pequenas altitudes e declividades, quanto a valores centimétricos. O método topográfico (teodolito e estação total) mostrou-se mais preciso. Pois, apesar de complementar as inspeções na superfície, as inspeções visuais e a instrumentação de barragens são formas essenciais no monitoramento constante.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas – IPAAM e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA que contribuíram para a viabilidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] BORGES, A. de C. Topografia Aplicada a Engenharia Civil. Vol. 1. Ed. 2. São Paulo: Blücher. 1992. p. 192.

[2] DAS, Braja M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 6ª edição. São Paulo: Thompson Learning, 2007.

[3] DEBEVEC, P. E. et al. Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach. SIGGRAPH conference proceedings. 1996. 10 p.

[4] ESRI. Environmental Systems Research Institute. ARC/INFO. v.7.1.1. Help on Line. Redlands, Califórnia: ESRI. 1997.

[5] FONSTAD, M. A. et al., Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement. Earth Surface Processes and Landforms. vol. 38, No. 4, 2013. pp. 421–430.

[6] ICOLD. International Commission on Large Dams. Dam Safety Management: Operational phase of the dam life cycle. Paris, Bulletin 154, abril/jun. 2017.

[7] MATOS, A.T.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Barragens de Terra de Pequeno Porte. Viçosa: UFV. 2013.

[8] SILVEIRA, J.F.A., OLIVEIRA, K.D. Métodos de Inspeção Remota de Barragens. In: Revista Brasileira de Engenharia de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB). Ano V. n. 08. Rio de Janeiro: CBDB, 2018.

[9] VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo: McGraw-Hill, 1977.

[10] SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. International Journal of Computer Vision, v. 80, n. 2, 2008, pág. 189–210.

[11] SZELISKI, R. Computer vision: algorithms and applications. vol. 1. Washington, EUA: Springer. 2010.

Capítulo 5

Ferramenta computacional usada para o dimensionamento de sistemas de refrigeração e análise da viabilidade entre as tecnologias convencional e inverter

João Vitor Ferreira Araujo
Janine Cavalcante de Oliveira
Fernando Nunes Belchior
Leonardo Queiroz Moreira

Resumo: O avanço tecnológico, a urbanização e o crescimento industrial, sobretudo nos países em desenvolvimento, têm ocasionado o aumento na demanda por energia elétrica. Em contrapartida, há evidências de que programas de eficiência energética são economicamente mais viáveis que programas de expansão da matriz de geração energética. Muitos países estão demonstram preocupação quanto à eficiência energética, desde os equipamentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como os aparelhos utilizados pelos consumidores finais, buscando minimizar as perdas e os desperdícios de energia elétrica. Os aparelhos de ar condicionado ocupam uma posição de destaque no consumo de energia elétrica no Brasil, devido ao clima tropical, demandando a sua instalação em todas as regiões do país. Neste sentido, o presente trabalho possui o objetivo de realizar um estudo a respeito das políticas públicas brasileiras sobre Eficiência Energética e como elas se aplicam aos diferentes tipos de tecnologias de condicionadores de ar disponíveis no mercado. Além disso, foi elaborada uma ferramenta de cálculo de carga térmica para o dimensionamento de sistemas de ar condicionado que obteve resultados satisfatórios quando validado através de modelos alternativos disponíveis em fontes bibliográficas. Por fim, a ferramenta apresenta qual a tecnologia de ar condicionado é mais viável financeiramente dado o consumo energético da aplicação.

Palavras-chave: Carga Térmica. Condicionadores de Ar. Eficiência Energética.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de condicionamento de ar já era aplicado há séculos atrás, onde a água de aquedutos era circulada através das paredes de casas para arrefecê-las. Durante muito tempo, o homem tentou livrar-se do calor, utilizando ventiladores, armazenando gelo do inverno e vários outros métodos que não se mostraram comercialmente viáveis.

O princípio básico de um aparelho de ar condicionado é utilizar um fluído que será resfriado a uma temperatura inferior a temperatura do ambiente ao qual se deseja resfriar e forçar a troca de calor entre o ar e este fluido. Desse modo, os condicionadores de ar possuem quatro componentes principais que funcionam em um ciclo fechado: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador (SHAPIRO E MORAN, 2009). A busca por equipamentos cada vez mais potentes e econômicos revelam um futuro que visa a eficiência energética a baixo custo e acessível a todos.

O crescimento demográfico, o desenvolvimento econômico dos países do sul e o crescente consumo de recursos são possíveis razões para justificar o aumento no consumo de energia elétrica. Conforme Kammen e Sunter (2016), o bem-estar, os aspectos culturais e sociais e a competitividade econômica de uma população são diretamente afetados por sua capacidade energética. Em contraparte, os danos ambientais causados pelo aumento na produção de recursos energéticos fazem com que países busquem um uso de energia cada vez mais eficiente. Outro fator importante, como destaca Cardoso (2008), se trata do investimento em políticas públicas de aumento na eficiência energética, que levam a maiores benefícios econômicos que investimentos no aumento da capacidade de geração de energia elétrica de um país.

Nesse contexto, o presente trabalho busca realizar um estudo a respeito das políticas públicas brasileiras sobre Eficiência Energética e como elas se aplicam aos diferentes tipos de tecnologias de condicionadores de ar disponíveis no mercado, através da construção de uma base de cálculo que forneça o correto dimensionamento de um sistema de condicionamento de ar de um determinado ambiente considerando variáveis como área do ambiente, janelas, quantidade de ocupantes e presença de equipamentos elétricos. Será realizada uma validação do modelo com base nos trabalhos realizados por Almeida (2016) e Inácio (2014). Ademais, será calculada a carga térmica total para uma das salas do novo Centro de Aulas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás, localizada na cidade de Aparecida de Goiânia – GO e, também, será determinada se é mais viável financeiramente a instalação de aparelhos tipo *inverter* ou convencionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos importantes ao entendimento do trabalho, explorando as políticas públicas sobre eficiência energética no mundo e no Brasil e as tecnologias disponíveis de condicionadores de ar. Também contemplará os conceitos teóricos acerca do projeto de instalação de ar condicionado. Por fim, elucidará a respeito das ferramentas para avaliar a viabilidade financeira de projetos.

2.1. POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1.1. MUNDO

O crescimento demográfico, o desenvolvimento econômico dos países do sul e o crescente consumo de recursos são possíveis razões para justificar o aumento no consumo de energia elétrica. Conforme Kammen e Sunter (2016), o bem-estar, os aspectos culturais e sociais e a competitividade econômica de uma população são diretamente afetados por sua capacidade energética. Em contraparte, os danos ambientais causados pelo aumento na produção de recursos energéticos fazem com que países busquem um uso de energia cada vez mais eficiente.

No ano de 1960, os países Iraque, Irã, Kuwait, Arábia Saudita e Venezuela se uniram formando a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) objetivando fortalecimento econômico, organização da exportação e maior influência nos preços praticados no mercado. No início dos anos de 1970, em contraposição ao apoio dos Estados Unidos à Israel na guerra de Yom Kippur, os países árabes da OPEP suspenderam o fornecimento de petróleo aos países apoiadores de Israel configurando o primeiro choque do petróleo (MARINHO, 2010).

Mais tarde, nos anos de 1978 e 1979, em decorrência da Revolução do Irã e da ascensão do governo xiita de Aiatolá Khomeini, ocorreu a segunda suspensão do fornecimento de petróleo pelos países árabes integrantes da OPEP. Diante de ambas as paralizações, o preço do petróleo atingiu as maiores altas históricas impactando diretamente a economia mundial (MARINHO, 2010).

A Alemanha em 2016 foi considerada o país mais eficiente com relação ao uso de recursos energéticos pelo *American Concil for na Energy-Efficient Economy* (ACEEE). Através do Ministério da Economia e da Energia (BMWi), o país executou linhas de financiamento a projetos de eficiência energética, programas de etiquetagem, incentivo a pesquisa e desenvolvimento e políticas de normalização técnicas de eficiência energética no âmbito industrial, totalizando no ano de 2017, 119 esforços ativos sobre o tema (ADEME, 2017).

Outro programa de grande relevância desenvolvido no Reino Unido é o *Energy Saving Trust* (EST), cujo objetivo é desenvolver ações dirigidas à questão da eficiência energética e a reduzir a emissão de CO_2 nos setores comercial e residencial (CARDOSO, 2012).

Com sua economia pautada na atividade industrial, a China possui grande relevância na discussão mundial sobre eficiência energética. Isso por se tratar de um dos maiores PIBs do mundo e um dos maiores consumidores de combustíveis fósseis mundial, consequentemente, um grande emissor de CO_2, principal gás responsável pelo efeito estufa (IEA, 2015).

Os Estados Unidos da América também foi um dos países pioneiros a colocar a questão da eficiência energética em destaque após as crises do petróleo que elevou os preços do combustível no mundo (DIXON *et al.*, 2010). Seu primeiro esforço foi concretizado no ano de 1975 com a promulgação do "*Energy Policy and Conservation Act (EPCA)*", no qual, já naquele momento, previa índices mínimos de eficiência energética para alguns aparelhos eletrodomésticos (BEJAY, 2018). Somente entre os anos de 1998 a 2000, o Estado Americano investiu um volume de U$ 7 bilhões em projetos de pesquisa e desenvolvimento voltados à processos industriais e produção de equipamentos eletrônicos de uso doméstico (IEA, 2014).

No ano de 1992, a agência *Environmental Protection Agency* (EPA) colocou em ação o programa de etiquetagem denominado *Energy Star*. Trata-se de um programa de etiquetagem voluntário que indica qual produto é o mais eficiente dentro de sua categoria. Conforme ressalta Cardoso (2012), é muito comum encontrar o selo *Energy Star* em equipamentos de aquecimento e refrigeração, instrumentos de iluminação, materiais utilizados na construção civil e projetos industriais. A Figura 1 retrata um exemplo do selo *Energy Star.*

Figura 1 – Selo *Energy Star*

Fonte: Energy Star (2020)

2.1.2. BRASIL

O Brasil, por outro lado, ocupa a 22ª posição na lista de países mais energeticamente eficientes indicada pela ACEEE, ficando atrás de países como Índia, Tailândia e África do Sul (ACEEE, 2016). Segundo os dados do Balanço Energético Nacional de 2020, o Brasil esteve entre os dez países com maior capacidade instalada de geração elétrica no mundo e somente entre os anos de 2016-2017 houve um aumento de 4,3%, a quarta maior variação entre os dez países da lista. No entanto, estudos indicam que a taxa de conversão de energia primária em energia útil é na ordem de 33% indicando um grande potencial de melhora ao tornarmos os processos e equipamentos mais eficientes (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

A matriz elétrica do Brasil em sua grande maioria é constituída por usinas hidrelétricas, cerca de 60,5%, e pelas usinas termoelétricas, em segundo lugar, (24,2%) (EPE, 2020). No entanto, as usinas termoelétricas são utilizadas em maior escala nas épocas de seca, desse modo, a emissão de CO_2 não representa uma

grande preocupação. Porém, com a intensificação das secas, há a possibilidade de desabastecimento de água, prejudicando a produção de energia e a vida da população.

Por essas razões, Cardoso (2008) afirma que investimento em programas de eficiência energética são mais viáveis economicamente do que investimentos na expansão da matriz geradora. O Brasil a partir dos anos de 1960, devido à política de incentivo às exportações, vivenciou um crescimento expressivo economicamente e de acelerado desenvolvimento industrial. Para dar suporte, foram construídas diversas plantas de geração de energia hídrica e o volume de importação de petróleo era equivalente à 88% de todo petróleo consumido no país (PICCININI, 1994).

No ano de 1984, em um protocolo firmado entre a Associação Brasileira da Industria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), o MIC e o Ministério de Minas e Energia (MME), foi criado o Programa de Conservação de Energia Elétrica em eletrodomésticos que, a partir de 1992, passou a ser chamado Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (MME, 2011). O PBE é coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), e possui como principal objetivo informar ao consumidor final características como eficiência energética, capacidade e ruído de aparelhos, possibilitando assim escolhas mais conscientes. O programa consiste em classificar os produtos em categorias de “A” a “E”, conforme sua eficiência considerando a relação entre consumo de energia e capacidade. Assim, o produto classificado com a categoria “A” é mais eficiente que o produto classificado como “B” que, por sua vez, é mais eficiente que um produto “C” e, assim por diante, até a categoria “E” (CARDOSO, 2012).

A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) (Figura 2) fornece ao consumidor informações como o tipo de equipamento, nome do fabricante, logomarca comercial, indicação de modelo, indicação da classificação de eficiência energética do modelo, indicação do consumo de energia, informações adicionais relevantes ao consumidor e assinatura do INMETRO. Maginador (2017) salienta uma consequência muito importante do programa. De acordo com a autora, o consumidor em posse de tais informações irá tomar decisões de compra mais conscientes e preferir produtos que estejam melhor classificados. Assim, os fabricantes serão estimulados a disponibilizar produtos cada vez mais eficientes no mercado, em uma mecânica de melhoria contínua.

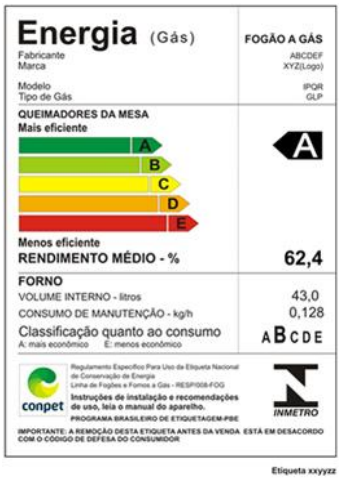
Um ano após a criação do PBE, em 30 de dezembro de 1985, por meio de uma parceria entre o MME e o Ministério da Indústria e Comércio, surge pela Portaria Interministerial 1.877, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Com propósito de promover a eficiência energética no consumo final e reduzir o desperdício, o Procel se organiza em subprogramas para desenvolver suas ações. Procel (2020) destaca as iniciativas:

1. Procel Gestão Energética Municipal que objetiva otimizar o uso de energia em prédios públicos;
2. Procel Indústria que apoia o desenvolvimento industrial;
3. Procel Sanear que desenvolve ações para o uso otimizado dos recursos hídricos e universalização do saneamento básico;
4. Procel Reluz que visa ganhos de eficiência energética na iluminação pública;
5. Procel Edifica com foco em ações de eficiência energética na construção civil;
6. Programa Selo Procel que classifica aparelhos eletrodomésticos de acordo com seu nível de eficiência energética.

Conforme dados do Procel (2021), entre os anos de 1986 a 2020 o programa proporcionou através de suas ações uma economia energética na ordem de 195,2 TWh, sendo apenas no ano de 2020 22,02 bilhões de kWh, valor equivalente a 4,64% do consumo total. Entre todas as suas iniciativas destaca-se por ser responsável por 98% dos ganhos, o Programa Selo Procel criado em 1993 em ação conjunta entre o Procel e o INMETRO (PROCEL, 2012). Trata-se de um programa voluntário de etiquetagem que certifica o produto mais eficiente energeticamente entre os equipamentos pertencentes à categoria A do PBE. A Figura 3 apresenta um exemplo do Selo Procel.

Diante das rápidas mudanças no cenário geoeconômico brasileiro e internacional, fez-se necessária uma atualização no PNE 2030. Então, no dia 16 de dezembro de 2020, foi aprovado pelo MME o Plano Nacional de Energia 2050. Uma importante premissa que foi alterada diz respeito à flexibilidade quanto aos eventos adversos que, ao ocorrerem, causam um grande impacto no planejamento. Passou a ser considerado também, uma perspectiva de abundância de recursos energéticos no longo prazo, diferentemente do PNE 2030, que era pautado na finitude desses recursos (EPE, 2020).

Figura 2 – ENCE



Fonte: INMETRO (2006)

Figura 3 – Selo Procel

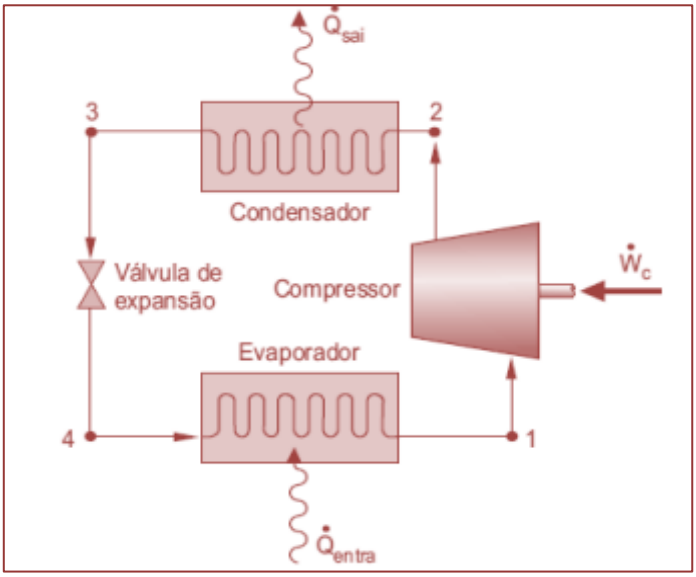
Fonte: Procel (2020)

2.2. TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS DE CONDICIONADORES DE AR

No mercado há duas classes de sistemas de condicionadores de ar, quais sejam, o sistema de expansão direta e o sistema de expansão indireta. A primeira classe corresponde aos aparelhos que utilizam um gás refrigerante que efetua a troca de temperatura com o ar, retirando calor do ambiente ao qual se deseja resfriar. Já os sistemas de expansão indireta possuem uma unidade de produção de água resfriada que circula através do sistema de serpentinas realizando a troca de calor com o ar de maneira análoga ao sistema de expansão direta. Por apresentarem uma estrutura mais compacta, o sistema de expansão direta é comumente utilizado em aparelhos de uso doméstico e comerciais de pequeno porte e o sistema de expansão indireta é destinado ao uso comercial de grande porte e industrial (CARDOSO, 2012).

O princípio básico de um aparelho de ar condicionado é utilizar um fluido que será resfriado a uma temperatura inferior a temperatura do ambiente ao qual se deseja resfriar e forçar a troca de calor entre o ar e este fluido. Desse modo, os condicionadores de ar possuem quatro componentes principais que funcionam em um ciclo fechado: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador (SHAPIRO E MORAN, 2009). A figura 4 esquematiza um sistema de condicionador de ar:

Figura 4 – Representação de um sistema de ar condicionado



Fonte: Shapiro e Moran (2009)

O ciclo se inicia na unidade compressora que possui função de aumentar a pressão e temperatura do fluido refrigerante. Na fase 2, o fluido passa pela unidade condensadora que forçará a troca de calor entre o fluido e o ambiente externo, forçando a troca de estado físico do fluido para o estado líquido. Na fase 3, o fluido passa pela válvula de expansão que restringirá a passagem dele, reduzindo a pressão do sistema, provocando a ebulição do fluido e, consequentemente, abaixando sua temperatura. Por fim, na evaporadora, o fluido a uma temperatura mais baixa que o ambiente que se deseja resfriar circula através de um sistema de serpentinas absorvendo calor do ar (SHAPIRO E MORAN, 2009).

2.2.1. TIPO JANELA

Um modelo de aparelho de ar condicionado muito comum é o ar condicionado de parede ou janela. O aparelho possui estrutura compacta que abriga tanto a unidade condensadora quanto a unidade evaporadora, é instalado na parede o que o torna pouco flexível, apresenta um volume considerável de ruídos e possui menor eficiência energética. O modelo apresenta como vantagens a facilidade de instalação, valor de mercado inferior aos demais e fácil manutenção. É comercializado em potências que variam entre 6.000 e 30.000 BTUs. A figura 5 exemplifica um aparelho de ar condicionado tipo janela (DUFRIO, 2017).

2.2.2. TIPO SPLIT

Outra tecnologia de condicionadores de ar muito comum, tanto em aplicações domésticas quanto comerciais, é o ar condicionado tipo *split*. Se caracteriza principalmente por ter a unidade condensadora separada da unidade evaporadora, sendo a condensadora instalada no ambiente externo e a evaporadora no ambiente interno ao que se deseja climatizar. Possuem capacidade frigorífica que variam entre 9.000 e 60.000 BTUs e apresentam como vantagem menores níveis de ruído, apresenta *design* variado, flexibilidade de instalação e filtragem de ar (CREDER, 20011). A figura 6 apresenta uma ilustração de um ar condicionado tipo *split*.

No mercado é possível encontrar diferentes modelos de condicionadores de ar tipo *split*, conforme Dufrio (2017) pode-se destacar:

a) *High-wall* ou Parede: possui como principal característica a instalação da unidade evaporadora em um ponto alto da parede. É ideal para ambientes de pequeno a médio porte, ou seja, locais de baixa circulação de pessoas. É o modelo mais comum de aparelhos *split*.

b) *Multi-split* caracterizam-se por apresentarem apenas uma unidade condensadora que alimenta mais de uma unidade evaporadora. Por essa razão, o modelo é uma boa opção para locais onde o espaço para alocar diversas unidades condensadoras é limitado.

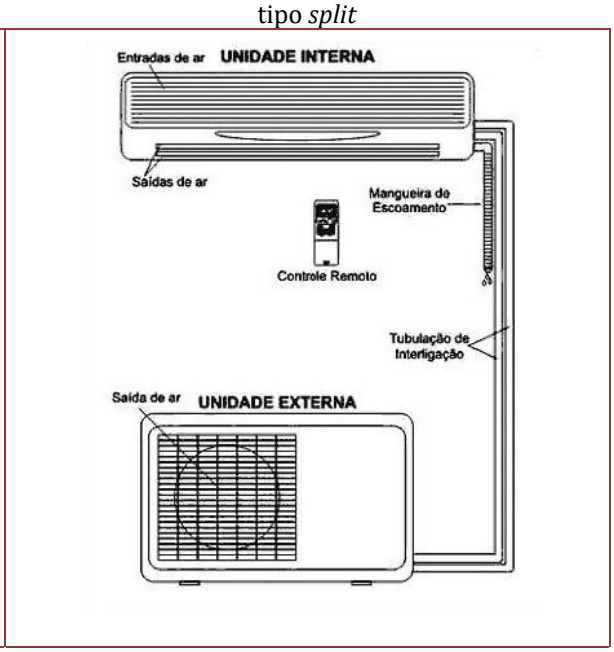
c) Cassete: indicado para ser instalado em espaços amplos, devido à sua alta capacidade de refrigeração. Sua unidade evaporadora é instalada no teto, na região central do local onde se deseja resfriar, e possui quatro saídas de ar. Apresenta uma limitação quanto a altura de rebaixo do gesso, sendo necessário no mínimo 35 centímetros para sua instalação.

d) Piso teto: se diferencia do *high-wall* principalmente por poder ser instalado tanto próximo ao chão, quanto no teto. É indicado para o uso comercial devido a sua alta capacidade de refrigeração. Outra característica interessante desse tipo de equipamento é que ele possui um metro a mais de serpentina o que possibilita o envio do ar frio em maiores distâncias.

Figura 5 – Ar condicionado tipo janela

Fonte: Dufrio (2017)

Figura 6 – Representação de um ar condicionado tipo *split*



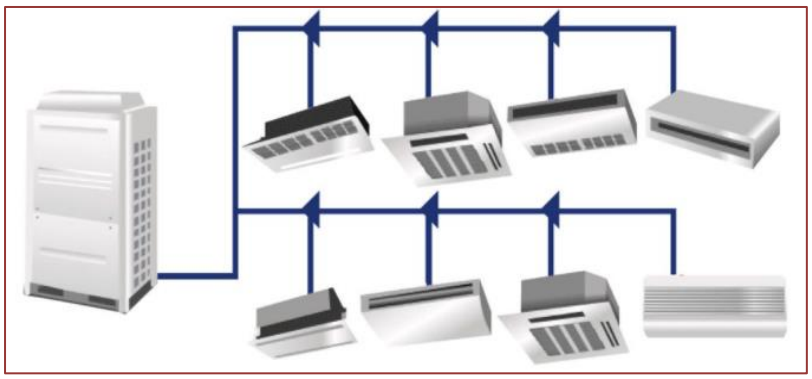
Fonte: CONSTRUINDODECOR (2018)

2.2.3. VAZÃO VARIÁVEL DE REFRIGERANTE (VRV)

Há ainda os condicionadores de ar com sistema de Vazão Variável de Refrigerante (VRV). Os VRVs possuem alta capacidade de refrigeração e permitem grande flexibilidade de instalação. Por essa razão, são destinados a residências de grande porte e a aplicações comerciais de médio e de grande porte. Os sistemas VRVs são caracterizados por possuírem um conjunto de unidades condensadoras que alimentam múltiplas unidades internas (evaporadoras) de diferentes capacidades. Para coordenar essa ligação, são equipados com sistemas de microprocessadores que administram o conjunto de forma automatizada (DOS SANTOS, 2017). A figura 7 ilustra um ar condicionado VRV no qual há uma unidade condensadora que atende à seis unidades evaporadoras de modelos variados.

As principais vantagens de se utilizar os condicionadores de ar do tipo VRV são: permitem grande flexibilidade, uma vez que uma unidade condensadora pode atender a até 64 unidades evaporadoras, o sistema possui módulos que adaptam a capacidade frigorífica à necessidade do ambiente. Equipamentos desse tipo são de fácil instalação e possuem baixo índice de manutenção. Além disso, o sistema utiliza o fluido R410A, que não causa danos à camada de ozônio por não possuir cloro em sua composição (ELETROFRIGOR, 2020).

Figura 7 – Ilustração de um sistema de Vazão Variável Refrigerante (VRV)

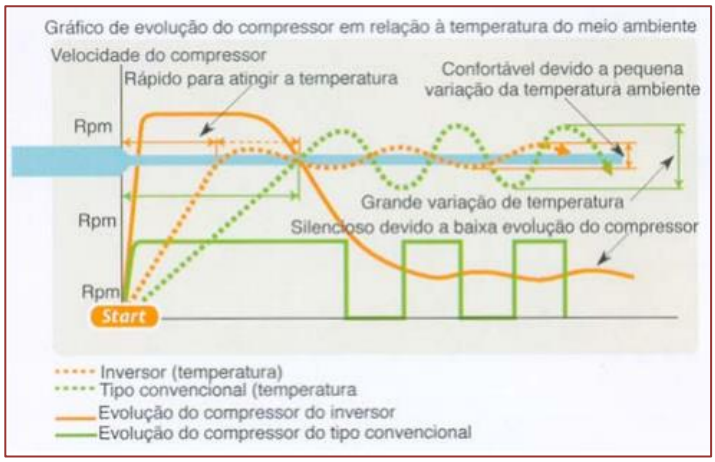


Fonte: Eletrofrigor (2020)

2.2.4. SISTEMA *INVERTER*

O sistema de refrigeração com tecnologia inverter caracteriza-se por realizar o controle de rotações do compressor, regulando o fluxo do fluido refrigerante, desse modo, mantém o controle da temperatura do ambiente praticamente constante. Em contrapartida aos sistemas convencionais que desligam os motores, uma vez que a temperatura desejada é atingida e ligam novamente quando há variações. Por essa razão, como afirma Rezende (2012), os condicionadores de ar que possuem o sistema *inverter* podem apresentar um consumo de energia até 40% inferior aos sistemas convencionais. Em decorrência de operar o compressor a baixas rotações quando a temperatura se encontra estabilizada, há uma redução significativa no nível de ruído produzido o que gera um ganho de conforto ao usuário. A Figura 8 apresenta uma comparação em termos da variação da temperatura do ambiente e a velocidade de rotação do compressor entre os sistemas *inverter* e split convencional.

Figura 8 – Comparação entre o funcionamento de um sistema split *inverter* e um split convencional



Fonte: Fujitsu (2016)

Como pode-se observar, os sistemas *inverter* se caracterizam por atingir mais rapidamente a temperatura ideal, possuem menor oscilação de temperatura, são mais eficientes no consumo energético e são mais silenciosos, por operarem em baixas rotações (FUJITSU, 2016).

2.3. PROJETO DE INSTALAÇÃO DE AR CONDICIONADO

Creder (2011) descreve um método para a correta elaboração de um projeto de ar condicionado, considerando fatores importantes, como paredes externas e telhados, transmissão de calor do sol em janelas, circulação de pessoas, iluminação e equipamentos elétricos. Além disso, o autor dispõe o conjunto teórico para realizar o cálculo da carga térmica de cada uma das variáveis descritas e, desse modo, possibilita o dimensionamento do sistema a ser instalado. De modo complementar, a Norma Brasileira (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 16401 de 2008, traz os valores de referência a serem utilizados no cálculo (ABNT, 2008).

2.3.1. CONFORTO TÉRMICO

Segundo Fanger (1970), entende-se por conforto térmico as diferentes combinações entre tipos de vestimenta, atividade metabólica, e condições térmicas ambientais que resultam em uma melhor sensação de conforto para a maior parcela das pessoas. *American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers* - ASHRAE (2005) pode-se interpretar o conceito de conforto térmico também como estado da mente que expressa bem-estar com o ambiente térmico. Conforme a norma brasileira (NBR) 16401, os fatores ambientais que afetam a sensação de conforto térmico são a temperatura, umidade e velocidade do ar.

A ASHRAE (2005) define a escala de conforto térmico sendo -1, -2 e -3 para avaliar de levemente frio para muito frio, 0 para uma condição neutra e +1, +2 e +3 para definir de levemente quente a muito quente. Creder (2011) propõe faixas de temperatura e umidade do ar para diferentes locais e finalidade de uso, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de Conforto

Finalidade	Local	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Conforto	Residências, Hotéis, Escritórios, Escolas	23 a 25	40 a 60
Lojas de curto tempo de ocupação	Bancos, Barbearias, Cabeleireiros, Lojas, Supermercados	24 a 26	40 a 60
Ambientes com grande carga de calor	Teatros, Auditórios, Templos, Cinemas, Bares, Lanchonetes, Restaurantes, Bibliotecas	24 a 26	40 a 65

Fonte: Adaptado de Creder (2011)

2.3.2. PAREDES EXTERNAS E TELHADOS

A energia solar que incide sobre superfícies opacas como paredes externas e telhados é transmitida ao ambiente interno tanto por condução, como por convecção. Pode-se definir o fluxo de energia em função da temperatura do meio externo, a temperatura interna ao ambiente, a área da superfície, o coeficiente de resistência térmica e um acréscimo ao diferencial de temperatura característico da superfície (CREDER, 2011). A Equação (1) expressa essa relação.

$$Q_s = A * U[(t_e - t_i) + \Delta t] \quad (1)$$

Na qual,

Q_s = Carga térmica da superfície em Watts; t_e = Temperatura externa em °C; t_i = Temperatura interna em °C; A = Área da superfície em m^2; Δt = Acréscimo ao diferencial de temperatura dado na tabela; U = Coeficiente de resistência térmica.

O coeficiente de resistência térmica U é conceituado por Creder (2011) como sendo o fluxo de calor por hora através de um metro quadrado de superfície. Em situações em que há diferentes materiais que compõem a superfície, o coeficiente U total é inverso à soma das resistências de cada material. A resistência total é calculada da mesma forma que resistências em série de um circuito elétrico. Dessa forma, para calcular a resistência total de uma parede comum a Equação (2) pode ser utilizada.

$$R = \frac{1}{h_e} + \left(2 * \frac{1}{C_r}\right) + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{k_t} \quad (2)$$

Na qual,

h_e = Coeficiente convectivo do ar exterior; h_i = Coeficiente convectivo do ar interior; C_r = Condutância do reboco; k_t = Condutividade do tijolo comum.

Conforme Creder (2011), os valores de referência a serem considerados para materiais de construção mais comuns são, conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Coeficiente de transmissão Calor dos Materiais de Construção

Material	Coeficiente (kcal/h * m^2 * °C)
Tijolo comum (k_t)	1,11
Reboco (C_r)	2,39
Filme do ar exterior (h_e)	19,5
Filme do ar interior (h_i)	7,13

Fonte: Adaptado de Creder (2011)

Assim, o coeficiente de resistência térmica U é dado pela Equação (3).

$$U = \frac{1}{R} \quad (3)$$

Por fim, Creder afirma que para determinar o valor da carga térmica transmitida por superfícies opacas deve-se considerar os seguintes valores de referência para o acréscimo ao diferencial de temperatura expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Acréscimo ao diferencial de temperatura para cores médias

Superfície	Δt (°C)
Telhado	16,6
Parede voltada para o leste ou oeste	11,1
Parede voltada ao norte	5,5
Parede voltada ao sul	0

Fonte: Adaptado de Creder (2011)

2.3.3. TRANSMISSÃO DE CALOR DO SOL EM JANELAS

Segundo Creder (2011), a energia transmitida através da insolação às superfícies transparentes subdivide-se em uma parcela que é refletida, outra que é absorvida pelo material e a porção que penetra ao ambiente. Desse modo, para fins de projeto, somente a quantidade de energia que atravessa a superfície é considerada. Além disso, a presença de cortinas, toldos e persianas provoca uma redução na quantidade de calor e, por essa razão, também deve ser considerada. As tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, o coeficiente de transmissão de calor solar através de superfícies transparentes e os coeficientes de redução em decorrência de fatores de proteção.

Tabela 4 – Coeficiente de transmissão de calor solar através do vidro

Dias do ano vs Face do prédio	S	SE	E	NE	N	NO	O	SO	CLARABOIA
22 de dezembro	98	420	474	222	49	217	440	430	740
21 de janeiro a 21 de novembro	65	384	480	245	57	250	443	384	734
22 de fevereiro a 23 de outubro	38	342	489	343	114	334	448	342	691
22 de março a 22 de setembro	38	255	458	418	229	418	439	225	636

Fonte: Adaptado de Creder (2011)

Tabela 5 – Coeficiente de redução de calor por fato de proteção

Proteção	Coeficiente de redução
Toldos ou persianas	0,15 – 0,20
Persianas internas e refletoras	0,50 – 0,66
Cortinas internas brancas (opacas)	0,25 – 0,61

Fonte: Adaptado de Creder (2011)

Para determinar a quantidade de calor em kcal/h que atravessa as janelas, Creder (2011) relacionou a área do vidro da janela e o coeficiente de transmissão de calor através da Equação (4):

$$Q_v = A * U \quad (4)$$

Uma vez definida a quantidade de energia solar transmitida, basta multiplicar o valor pelo coeficiente de redução para os casos em que há presença de toldos, persianas ou cortinas (CREDER, 2011).

2.3.4. CIRCULAÇÃO DE PESSOAS

Ainda conforme Creder (2011), um importante fator a ser considerado no projeto é o número de pessoas que ocupam o ambiente. Isso porque, durante o mecanismo de regulação da temperatura corporal, o organismo realiza troca de calor com o ambiente. Creder (2011) afirma que, se o ambiente estiver a uma temperatura entre 15,6°C e 37°C, o corpo humano realiza trocas de calor com o meio na forma de calor sensível e latente.

A Norma Técnica da ABNT NBR16401 (2008) traz a quantidade de calor emitido por uma pessoa comum de acordo com o nível de atividade e local

A quantidade de calor total ou a influência do número de pessoas que ocupam o ambiente é dada pela Equação (5) na qual n é o número de pessoas e Q é a quantidade total de calor transmitido do corpo humano ao meio para cada nível de atividade (CREDER, 2011).

$$Q_{ps} = n * Q \quad (5)$$

2.3.5. ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Quando a potência elétrica real de um equipamento é conhecida, é possível calcular a carga térmica através da Equação (6), na qual k é o fator de correção para o uso de lâmpadas fluorescentes dado por Creder (2011) em decorrência do uso de reatores e 3,4 é o fator de conversão de Watts para BTU.

$$Q_{lp} = n° \; de \; lâmpadas * potência * k * 3{,}4 \quad (6)$$

Quando não é possível estimar a potência real do equipamento de iluminação, pode-se fazer uso de valores de referência adotados pela NBR 16401-1 (2008) para diferentes ambientes utilizando lâmpadas fluorescentes.

Ainda segundo a NBR 16401-1, a estimativa para a dissipação de calor de equipamentos elétricos é realizada de maneira análoga ao cálculo para a circulação de pessoas utilizando a equação (1), os valores de referência são dados pela Tabela 6.

Tabela 6 – Taxas típicas de dissipação de calor de equipamentos diversos

Equipamentos diversos	Dissipação recomendada (W)	Dissipação Recomendada (BTU)
Computador	65	222
Monitor pequeno (13 pol. a 15 pol.)	55	188
Monitor médio (16 pol. a 18 pol.)	70	239
Monitor grande (19 pol. a 20 pol.)	80	273
Impressora de mesa	100	341
Impressora de escritório pequena	160	546
Impressora de escritório grande	275	938
Copiadora de mesa	85	290
Copiadora de escritório	400	1365
Caixas registradoras	48	164
Máquina de café (10 xícaras)	1500	5118
Refrigerador (0,71 a 2,1 m^3)	310	1058
Forno de microondas	600 a 1400	2047 a 4777
Bebedouros refrigerados	700	2388

Fonte: Adaptado de NBR 16401-1 (2008)

Conforme Creder (2011), o cálculo também pode ser feito através da potência do equipamento, sendo esse um dado conhecido através da Equação (5).

2.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

2.4.1 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA)

Segundo Casarotto Filho e Kopittke (2010), pode-se entender TMA como a taxa mínima de rentabilidade de se investir em um projeto e não em outro, ou seja, o custo de oportunidade em se investir nesse projeto em relação às aplicações correntes e de pouco risco. Por outro lado, Laponni (2007), define a TMA como sendo a taxa mínima de rentabilidade que uma empresa exige ao iniciar o investimento em um novo projeto e, portanto, o custo de oportunidade de não se investir em outro. Para fins de cálculo de TMA é utilizado o cálculo do Custo Médio Ponderado do Capital (*Weighted Average Cost of Capital* ou WACC, em inglês), que é uma medida de custo de financiamento de um projeto.

2.4.2. FLUXO DE CAIXA DESCONTADO (FCD)

Este método tem como ênfase analisar a viabilidade de um projeto de investimento de capital tendo como base os fluxos de caixa futuros esperados, por meio de indicadores como o valor presente líquido (VPL). A fundamentação deste método é dada pela capacidade da empresa gerar caixa no futuro a valor presente. (BORSATTO JUNIOR, CORREIA e GIMENES, 2015).

Dessa forma, o fluxo de caixa descontado possui o objetivo de projetar para o tempo presente tais ganhos, para que a avaliação dos riscos e rentabilidade seja possível. O fluxo de caixa descontado se baseia no cálculo de 3 fatores: fluxo de caixa projetado, o valor residual que consiste no cálculo do valor do negócio ao fim do período e a taxa de desconto que é utilizada no cálculo do valor presente do fluxo de caixa futuro e o valor residual (CERBASI, 2003).

2.4.3. VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O valor presente líquido, consiste em trazer para o presente todos os fluxos de caixa de um projeto de investimento, sendo assim é somado ao valor inicial do investimento, usando a TMA como taxa de desconto. O cálculo de VPL é dado pela equação (7):

$$V_{PL} = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{Fc_t}{(1+i)^n} \qquad (7)$$

Onde:

VPL: Valor presente líquido (R$); FC: Fluxo de caixa (R$); t: Momento em que o fluxo de caixa ocorreu (anos); i: Taxa mínima de atratividade; n: Período de tempo (anos).

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo serão apresentadas as características da pesquisa do presente trabalho, considerando sua finalidade e aplicação, bem como, o procedimento adotado para elaboração da ferramenta de cálculo da carga térmica, validação do modelo, dimensionamento de um sistema de condicionadores de ar para uma sala do Centro de Aulas da Faculdade de Ciências e Tecnologias da UFG e a análise de viabilidade financeira entre a instalação de aparelhos tipo split *inverter* em relação aos aparelhos tipo split convencionais.

3.1. CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA

O presente trabalho teve como finalidade uma pesquisa exploratória, metodológica e aplicada. O caráter exploratório se dá pela busca pelo conhecimento em relação aos fatos históricos que concomitaram em políticas públicas focadas em eficiência energética e um levantamento também dos principais tipos de tecnologias de condicionadores de ar presentes no mercado. Metodológica por ter utilizado o método elaborado por Creder (2011) para o cálculo da carga térmica a ser retirado de um ambiente ao qual se deseja resfriar para o correto dimensionamento de sistemas de ar condicionado. Por fim, pesquisa aplicada, por objetivar contribuir com a comunidade endossando conhecimentos que auxiliarão em compras mais conscientes à ótica da eficiência energética.

Quanto aos meios, a pesquisa pode ser caracterizada como estudo de caso, pois realiza um dimensionamento de um sistema de ar condicionado para uma sala de aula, no qual são calculadas as cargas térmicas atribuídas à transferência de calor através de superfícies opacas, transferência de calor através de superfícies translúcidas, equipamentos eletrônicos e ocupação do local. Além disso, o trabalho também possui cunho bibliográfico, pois busca informações que se relacionem ao problema de pesquisa em artigos nacionais e internacionais, trabalhos acadêmicos, normas técnicas, livros e demais bibliografias que integram o estudo. Quanto à abordagem, a pesquisa pode ser classificada como qualitativo-quantitativo, no qual se fez uso de ambas as formas de análise, visando garantir maior conformidade diante dos dados obtidos.

3.2. PROCEDIMENTO

Para a composição do trabalho, inicialmente foi feito o levantamento, a leitura e o fichamento das fontes bibliográficas pertinentes através de livros, monografias, teses, dissertações, artigos de periódicos. A base de dados da pesquisa foi realizada, em especial, no Portal de Periódicos CAPES/MEC.

Posteriormente, foi feito o projeto para o dimensionamento da carga térmica utilizando o *software Microsoft Excel*. O modelo seguiu a metodologia elaborada por Creder (2011) e fez uso das equações e tabelas expostas no capítulo 2.3. Os números de referência utilizados no cálculo foram extraídos da ABNT NBR 16401 (2008) e do livro Instalações de Ar Condicionado de Creder (2011). A validação do modelo foi realizada através de análise comparativa entre a ferramenta elaborada e os trabalhos de Almeida (2016) e Inácio (2014).

Também foi realizada a coleta das informações necessárias para o dimensionamento do sistema de refrigeração de uma das salas do novo Centro de Aulas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG. Esse processo se deu utilizando o projeto arquitetônico e o projeto elétrico do prédio. Em posse de toda informação necessária, os dados foram inseridos no programa que, por sua vez, realiza os cálculos e retorna o resultado disposto em seguida no presente documento. Por fim, foi feita uma análise de viabilidade econômica para a instalação de aparelhos tipo *inverter* através da técnica de fluxo de caixa descontado, utilizando o indicador de valor presente líquido.

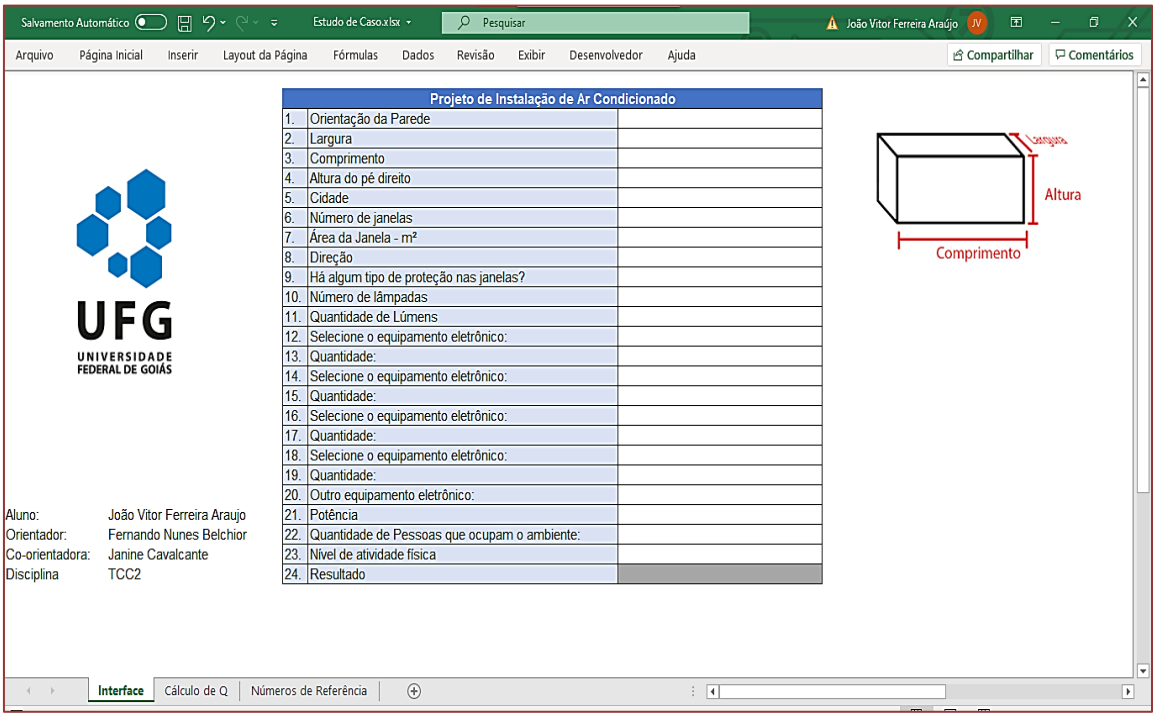
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo apresenta uma ferramenta utilizando o *Microsoft Excel* para o cálculo da carga térmica de ambientes dependendo de características como localização, orientação, dimensões, características estruturais, ocupação e presença de equipamentos eletrônicos. Foi utilizado como referência metodológica o livro Instalações de Ar Condicionado de Helio Creder (2011) e os números de referência contidos na norma ABNT NBR 16401 (2008). Para fins de validação, foram utilizados o trabalho de conclusão de curso de Pedro Henrique Almeida (2016), que também baseou seu trabalho na metodologia apresentada por Creder, bem como a dissertação de mestrado de William Inácio que utilizou a ABNT NBR 16401 como referência aplicando o *software Energy Plus* como ferramenta de cálculo. Por fim, será dimensionado um sistema de ar condicionado para uma sala presente no novo centro de aulas da Universidade Federal de Goiás (UFG), *campus* Aparecida de Goiânia.

4.1. O PROJETO

O projeto foi idealizado com a finalidade de realizar o cálculo da carga térmica de ambientes de uma forma intuitiva ao usuário. A Figura 9 apresenta o *layout* principal do programa.

Figura 9 – *Layout* da tela inicial do programa



Fonte: Autor

Nessa tela o usuário terá acesso a um formulário no qual ele deverá inserir as informações a respeito do ambiente ao qual ele deseja calcular a carga térmica. Para realizar o cálculo ele deve escolher primeiramente qual a direção em que a maior parede exposta ao ambiente está orientada, descrever quais as dimensões do ambiente (largura, comprimento e altura do pé direito) em metros, qual a cidade em que o ambiente se localiza, descrever o número de janelas do ambiente, suas dimensões em metros, a direção em que ela está orientada e se há algum tipo de proteção na janela, descrever o número de lâmpadas e qual a luminância necessária para o ambiente, informar se há equipamentos eletrônicos no ambiente e sua quantidade e, por fim, informar a ocupação do ambiente e o nível de atividade física dessas pessoas.

Após inserir todos os dados no sistema, será calculado automaticamente qual a influência de cada uma das variáveis na quantidade de carga térmica do ambiente na aba 'Cálculo de Q'.

4.2. VALIDAÇÃO DO MODELO

A primeira referência utilizada foi o trabalho de conclusão de curso de Pedro Henrique Soares de Almeida (2016), no qual foi dimensionado um sistema de ar condicionado para atender à sala A – 03, localizada no bloco A da Escola de Engenharia da UFG, em Goiânia – GO. A sala possui uma área de 25 m^2 e 3,5 m de pé direito, uma janela com área de 5 m^2 sem nenhum tipo de proteção orientada a sudeste. O ambiente possui os seguintes equipamentos eletrônicos: 8 lâmpadas de 40W, 1 computador tipo desktop, 1 monitor de 22 polegadas e uma impressora. Foi considerada uma ocupação de 5 pessoas em nível de atividade física moderada em trabalhos de escritório (130 W/pessoa).

Na sequência, foi utilizada a dissertação de mestrado de William dos Santos Inácio (2014) na qual foi utilizado o *software* disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos *Energy Plus* para calcular a carga térmica ideal para as salas de aula do Instituto Federal Fluminense (IFF) Câmpus Itaperuna. Como referência, foram utilizados os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16401. Para o objetivo de validar o modelo projetado, foi utilizada a sala B18 do bloco B, cujas características são: área de 41,47 m^2, pé direito de 3 m, 1 janela com dimensões de 4,85 m de largura e 1,46 m de altura orientada ao norte e sem proteção, 2 lâmpadas de 640 W e ocupação de 36 pessoas com nível de atividade "caminhando, parado em pé" (140 W/pessoa).

Conforme pode-se observar nas Tabelas 7 e 8, os resultados retornados pelo modelo foram satisfatórios uma vez que apresentaram um erro de +8,29% se comparado ao modelo de Almeida (2016) e -0,72% se comparado ao apresentado por Inácio (2014). Assim, fica evidente que o objetivo inicial de desenvolver um programa para ser utilizado para o cálculo da carga térmica de diferentes ambientes foi alcançado.

Tabela 7 – Comparação do projeto em relação ao modelo elaborado por Pedro Henrique (2016)

Modelo Proposto	Pedro Henrique (2016)	Diferença (%)
16.419,21 BTUs	15.058 BTUs	+8,29

Fonte: Autor

Tabela 8 – Comparação do projeto em relação ao modelo elaborado por William Inácio (2014)

Modelo Proposto	William Inácio (2014)	Diferença (%)
32.359,57 BTU	32.594 BTU	-0,72

Fonte: Autor

4.3. LOCALIZAÇÃO

O novo prédio da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG está localizado próximo à BR 153 na região leste da cidade de Aparecida de Goiânia, estado de Goiás, latitude 16°50'35" sul, longitude 49°10'35" oeste e altitude de 770 metros, conforme informações obtidas utilizando o *software Google Earth*. Conforme afirma Creder (2011), quando as condições climáticas especificas da cidade em que é feita a aplicação não estão disponíveis, é conveniente utilizar uma cidade que possua características semelhantes. Assim, foi utilizada a cidade de Goiânia – GO, cuja temperatura máxima média é 33°C e umidade relativa média de 75%.

4.4. CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

Para fins de cálculo foi escolhida a última sala do quinto pavimento do centro de aulas, cujas características são:

- Largura: 8,55 m;
- Comprimento: 11,00 m;
- Pé direito: 3,0 m;
- Janelas: 4 janelas de 1,20 m de largura e 1,40 m de altura orientadas a sudoeste, 1 janela de 2,85 m de largura e 1,40 m de altura e 1 janela de 3,035 m de largura e 1,40 m de altura orientadas a nordeste;
- Ocupação máxima de 73 alunos e 1 professor com nível de atividade considerado de "Atividade moderada em trabalhos de escritório";
- Iluminação: 12 luminárias e 24 lâmpadas de 18 W;
- Estimativa de 25 computadores ligados simultaneamente.

As Figuras 10 e 11 representam, respectivamente, a planta baixa do quinto pavimento do centro de aulas e a sala escolhida como estudo de caso.

Figura 10 – Planta do 5° pavimento do Centro de Aulas

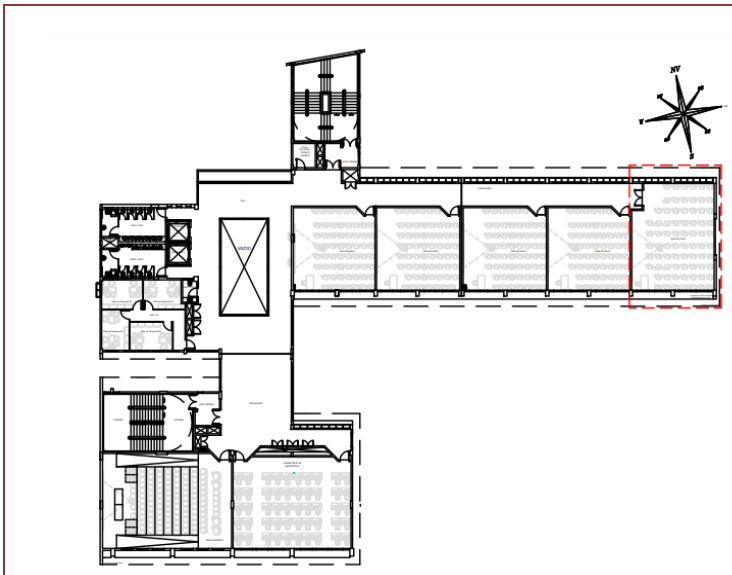
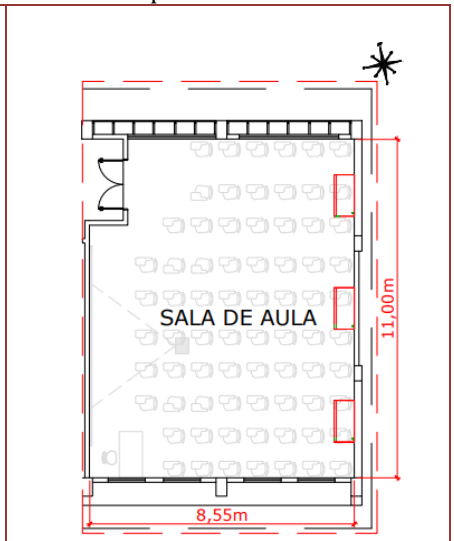


Figura 11 – Sala de aula escolhida para o estudo



Fonte: Autor

As condições de conforto foram adotadas conforme Creder (2011), sendo a temperatura de conforto de 23°C. Os resultados intermediários e total calculados da carga térmica estão dispostos na Tabela 9 em kcal/h e BTU/h.

Tabela 9 – Cargas térmicas calculadas

Tipo de influência	Carga Térmica (kcal/h)	Carga Térmica (BTU/h)
Superfícies Opacas	1.347,72	5.348,18
Superfícies Transparentes	6.441,764	25.562,99
Iluminação	454,82	1.768,85
Equipamentos Elétricos	1.397,50	6.448,52
Circulação de Pessoas	7.259,4	29.037,60
Total	16.901,20	68.166,14
Total Ajustado (10%)	18.591,32	74.982,76

Fonte: Autor

A Figura 12 mostra o resultado final retornado pelo programa, uma vez preenchidas todas as informações pertinentes.

Uma vez calculada a carga térmica, foi determinado a instalação de dois aparelhos de 36.000 BTUs totalizando, assim, uma capacidade de refrigeração instalada de 72.000 BTUs. Para determinar se seria viável a instalação de aparelhos de ar condicionado do tipo inverter, foram utilizados os modelos *Xperience* Série 42ZQ (convencional) e *Xperience* Série 42ZQV (*inverter*) do fabricante Carrier, cujas características estão dispostas na Tabela 13. Para os valores que estão na tabela 10, foram considerados 8 horas de utilização diária dos aparelhos, durante 5 dias na semana. O valor da tarifa de energia, referência mês de abril de 2021, foi de R$ 0,83056/kWh.

É importante observar que o cálculo da receita considerada se dá pela diferença entre o custo mensal do ar condicionado convencional e o custo do aparelho *inverter*. Além disso, o valor dos aparelhos foi cotado na rede de lojas Bemol e os demais valores pertinentes para o cálculo da análise financeira estão expostos na Tabela 11.

Figura 12 – Resultado final apresentado pelo programa

Projeto de Instalação de Ar Condicionado		
1.	Orientação da Parede	Parede voltada para o leste ou oeste
2.	Largura	8,55
3.	Comprimento	11
4.	Altura do pé direito	3
5.	Cidade	Goiânia (GO)
6.	Número de janelas (tipo 1)	4
7.	Largura da Janela - m (tipo 1)	1,2
8.	Altura da Janela - m (tipo 1)	1,4
8.	Direção (tipo 1)	SO
6.	Número de janelas (tipo 2)	2
7.	Largura da Janela - m (tipo 2)	3,035
8.	Altura da Janela - m (tipo 2)	1,4
8.	Direção (tipo 2)	NE
9.	Há algum tipo de proteção nas janelas?	Não
10.	Número de lâmpadas	24
11.	Potência (W)	18
12.	Selecione o equipamento eletrônico:	Computador
13.	Quantidade:	25
14.	Selecione o equipamento eletrônico:	
15.	Quantidade:	
16.	Selecione o equipamento eletrônico:	
17.	Quantidade:	
18.	Selecione o equipamento eletrônico:	
19.	Quantidade:	
20.	Outro equipamento eletrônico:	
21.	Potência	
22.	Quantidade de Pessoas que ocupam o ambiente:	74
23.	Nível de atividade física	Sentado, trabalho leve no escritório
24.	Resultado	74982,76 BTU

Fonte: Autor

Tabela 10 – Características dos aparelhos de ar condicionado cotados

Xperience Série 42ZQ (convencional)	*Xperience* Série 42ZQV (*inverter*)
Capacidade de refrigeração: 36.000 BTU	Capacidade de refrigeração: 36.000 BTU
Potência nominal: 3.480 W	Potência nominal: 3.260 W
Consumo energético mensal: 556,80 kWh	Consumo energético mensal: 521,60 kWh
Custo mensal: R$ 462,46	Custo mensal: R$ 433,22
Preço (maio/2021): R$ 6.264,00	Preço (maio/2021): R$ 8.999,00

Fonte: Autor

Tabela 11 – Valores de referência utilizados na análise de viabilidade financeira

Parâmetros considerados na análise financeira	
Horizonte de investimento	10 anos
Valor da tarifa de energia (abril/2021)	R$ 0,83056/kWh
Inflação 2020 (IBGE, 2021)	4,52 %
Selic Atual (BACEN, 2021)	3,50 %
Inflação Projetada 2021 (ITAÚ BBA, 2021)	5,30 %
Selic Projetada 2021-22 (ITAÚ BBA, 2021)	5,50 %

Fonte: Autor

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos no estudo de viabilidade financeira pela técnica do fluxo de caixa descontado, utilizando o cálculo do VPL e TIR.

Tabela 12 – Resultados do estudo de viabilidade

Resultados do estudo de viabilidade	
VPL (parâmetros atuais)	R$ 124,28
TIR (parâmetros atuais)	4,95 %
VPL (projeção final 2021)	R$ 82,84
TIR (projeção final 2021)	6,00%

Fonte: Autor

Para determinar a viabilidade financeira de um projeto através do método utilizado nesse trabalho, busca-se um resultado no cálculo do valor presente líquido maior que zero e uma taxa interna de retorno maior que a taxa mínima de atratividade. Portanto, tanto no cenário econômico atual, quanto no cenário econômico projetado pela instituição financeira utilizada como referência, os resultados apresentados mostraram que a utilização de aparelhos de ar condicionado split *inverter* são viáveis para o caso da sala estudada. É importante ressaltar que o baixo valor do VPL foi fortemente impactado pelo número de horas que o aparelho permanece em uso e por reduzir a análise somente a uma sala de todo o prédio. Assim, o esperado é que em uma avaliação mais ampla de todo o centro de aulas, dado que há ambientes com diferentes horários de utilização, o resultado da receita seja maior e, consequentemente, o projeto se pague em menos tempo apresentando um VPL maior.

5. CONCLUSÃO

O trabalho possibilitou o desenvolvimento de habilidades técnicas para a elaboração de projetos de refrigeração, levando em consideração os principais fatores para a determinação da carga térmica de ambientes. Foi desenvolvida uma ferramenta para o cálculo da carga térmica a ser retirada de um ambiente por um sistema de ar condicionado com uma acuracidade de 9,09% se comparado ao trabalho desenvolvido por Almeida (2016) e 0,26% se comparado à dissertação elaborada por Inácio (2014) na qual foi utilizado *software Energy Plus*, disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Assim, uma vez que nos testes realizados foram obtidos resultados que divergem em menos de 10%, pode-se concluir que a ferramenta elaborada se mostra confiável para estimar a carga térmica de ambientes e, assim, dimensionar a capacidade de refrigeração ideal para um sistema de ar condicionado. Foi dimensionado um sistema de refrigeração para uma das salas do novo Centro de Aulas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UFG obtendo, assim, um resultado satisfatório, uma vez que foi levado em consideração características estruturais do ambiente, os equipamentos elétricos instalados, a ocupação de pessoas e as características climáticas do local.

Ademais, foi realizada uma análise de viabilidade financeira comparando a instalação de aparelhos do tipo *inverter* e a instalação de aparelhos convencionais considerando o cenário econômico atual e o cenário projetado pelo Itaú BBA para o final do ano de 2021. Uma vez que os cálculos retornaram valores de VPL positivos e valores de TIR maiores que a taxa base de juros considerados, pode-se concluir que a instalação de modelos do tipo *inverter* além de ser mais eficiente do ponto de vista energético e ambiental, é também economicamente viável.

REFERÊNCIAS

[1] ACEEE. American Council for an Energy-Efficiency Economy. The 2016 International Energy Efficiency Scorecard, 2016. Disponível em: < https://www2.aceee.org/l/310911/2018-01-05/glrw9>, Acessado em: 19/05/2021.

[2] ADEME. Energy Efficiency Policy in Europe: L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie 2017. ASHRAE. Handbook Fundamentals – Thermal comfort. 2005.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401: Instalações de ar condicionado – Sistemas Centrais e Unitários. Rio de Janeiro. 2008.

[4] BEMOL. 2021. Ar-Condicionado Split 36.000 BTUs Carrier 42ZQA48C5 38CCU036515MC Classe B 220V. Disponível em: < https://www.bemol.com.br/split-36000-btus-carrier-42zqa48c5-38ccu036515mc-classe-b-220v-p1058300?v=1058301>. Acessado em: 19/05/2021.

[5] BEMOL. 2021. Ar Condicionado Split Teto Inverter XPower Carrier 36.000 BTUs Frio 220V. Disponível em: < https://www.bemol.com.br/ar-condicionado-split-teto-inverter-xpower-carrier-36-000-btus-frio-220v-42zqva36c5-p1077759>. Acessado em: 19/05/2021.

[6] CARDOSO, Rafael Balbino. Avaliação da economia de energia atribuída ao Programa Selo PROCEL em freezer e refrigeradores. 2008.

[7] CARDOSO, Rafael Balbino. Estudo dos impactos energéticos dos Programas Brasileiros de Etiquetagem Energética: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, 2012.

[8] CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. Análise de Investimentos: Matemática Financeira, Engenharia Econômica, Tomada de Decisão, Estratégia Empresarial. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

[9] CERBASI, Gustavo Petrasunas. Metodologias para determinação do valor das empresas: uma aplicação no setor de geração de energia hidrelétrica. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

[10] CONSTRUINDODECOR. Como instalar o ar condicionado. Disponível em: <http://construindodecor.com.br/como-instalar-o-ar-condicionado//> Acessado em: 04/12/2020.

[11] CREDER, Hélio. Instalações de ar condicionado. 6ª Edição. Rio de Janeiro. Livros Tecnicos e Cientificos. 2011.

[12] DE ALMEIDA, Paulo Henrique Soares. Impactos da instalação e manutenção de ar condicionado no consumo energético. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Goiás, 2016.

[13] DOS SANTOS, Anderson Pinho. ESTUDO E AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE EM SISTEMAS DE AR CONDICIONADO: UM COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS SPLIT SYSTEM E SISTEMA VRV (VAZÃO DE REFRIGERANTE VARIÁVEIS). 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará, 2017.

[14] DUFRIO. 2017. Conheça os principais tipos de ar-condicionado e suas diferenças. <https://www.dufrio.com.br/blog/ar-condicionado/comercial/os-principais-tipos-de-ar-condicionado-e-suas-diferencas/>. Acesso em: 07/03/2021.

[15] DUFRIO. 2017. Ar-condicionado janela: tire suas dúvidas sobre este equipamento. Disponível em: <https://www.dufrio.com.br/blog/ar-condicionado/residencial/ar-condicionado-janela-tire-suas-duvidas-sobre-este-equipamento>. Acesso em: 07/03/2021.

[16] DIXON, R. K.; MCGOWAN, E.; ONYSKO, G.; SCHEER, R. M. US energy conservation and efficiency policies: Challenges and opportunities. Energy Policy, v. 38, n. 11, p. 6398-6408, 2010.

[17] ELETROFRIGOR. 2020. O que é um Ar Condicionado VRF?. Disponível em: < https://www.eletrofrigor.com.br/o-que-e-um-ar-condicionado-vrf/>. Acesso em: 07/03/2021.

[18] ENERGY STAR. 2020. What's the difference between the Energy Guide and ENERGY STAR?. Disponível em: < https://www.energystar.gov/products/ask-the-experts/whats-the-difference-between-the-energy-guide-and-energy-star >. Acesso em: 23/03/2021.

[19] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica >. Acesso em: 25 /10/2020.

[20] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 18 /05/2021.

[21] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia PNE 2050. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 25/03/2021.

[22] FANGER, Poul O. et al. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering., 1970.

[23] FUJITSU. 2016. Ar condicionado tecnologia inverter. Disponível em: < https://www.fujitsu-general.com/br/products/tecnologiainverter.html >. Acesso em: 07/03/2021.

[24] GOLDEMBERG, José; VILLANUEVA, Luz Dondero. Energia, meio ambiente e desenvolvimento, 3ª edição. São Paulo. EDUSP. 2003.

[25] IEA. International Energy Agency Energy. Policies of IEA Countries: United States 2014 Review.

[26] IEA. Achievements of applicance energy efficiency standards and labelling programs. International Energy Agency. 2015.

[27] INÁCIO, William dos Santos. Dimensionamento da carga térmica de resfriamento de ambientes: estudo de caso no Instituto Federal Fluminense Campus Itaperuna. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Candido Mendes, 2014.

[28] INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia e Normalização e Qualidade Industrial. Regulamento específico para uso da etiqueta nacional de conservação de energia – ENCE. Linha de fogões e fornos a gás. 2006. Disponível em < http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pdf/resp008_06.pdf >. Acesso em: 23/03/2021.

[29] ITAÚ BBA. 2021. Projeções Cenário Brasil – Maio 2021. Disponível em: < https://www.itau.com.br/itaubba-pt/analises-economicas/projecoes/cenario-brasil-maio-2021#>. Acesso em: 19/05/2021.

[30] JUNIOR, José Luiz Borsatto; CORREIA, Everson Fernando; GIMENES, Régio Márcio Toesca. Avaliação de empresas pelo método do fluxo de caixa descontado: o caso de uma indústria de ração animal e soluções em homeopatia. Contabilidade Vista & Revista, v. 26, n. 2, p. 90-113, 2015.

[31] KAMMEN, Daniel M.; SUNTER, Deborah A. City-integrated renewable energy for urban sustainability. Science, v. 352, n. 6288, p. 922-928, 2016.

[32] LAPONNI, Juan Carlos. Projetos de Investimento na empresa. Rio de Janeiro: Elsevier 2007. 488 p.

[33] MAGINADOR, Juliana Aline Galan. Análise dos impactos dos programas de eficiência energética e proposições de melhorias dos programas nacionais. 2017.

[34] MARINHO, Havana Alicia de Moraes Pimentel. Estados Unidos: o contexto dos anos 1970 e as crises do petróleo. Revista Eletrônica História em Reflexão, v. 4, n. 7, 2010.

[35] MME. Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf. ENERGÉTICO, S. D. P. E. D.: Ministério de Minas e Energia: 156 p. 2011.
PICCININI, Maurício Serrão. Conservação de energia na indústria: as políticas adotadas na época da crise energética. 1994.

[36] PROCEL. Procel Info. 2020. Disponível em: < http:/www.procelinfo.com.br >. Acesso em: 25/10/2020.

[37] ____. Resultados PROCEL 2021 – Ano base 2020. Eletrobrás. Rio de Janeiro. 2021.

[38] ____. Resultados PROCEL 2018 – Ano base 2017. Eletrobrás. Rio de Janeiro. 2018.

[39] ____. Resultados PROCEL 2012 – Ano base 2011. Eletrobrás. Rio de Janeiro. 2012.

[40] REZENDE, Paulo Henrique Oliveira et al. Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

[41] SHAPIRO, Howard N.; MORAN, Michael J. Princípios da Termodinâmica para Engenharia. LTC, Ed, v. 6, 2009.

Capítulo 6

Correlação entre tamanho de grão e condutividade elétrica pela técnica de duas pontas

João Vitor Baptista Salgado
Wellington Mattos Pires
Talita Gama de Sousa
Luiz Paulo Mendonça Brandão

Resumo: O presente trabalho investiga a relação entre tamanho de grão e condutividade elétrica de aços IF a fim de fornecer prova de conceito de nova técnica de avaliação microestrutural in situ. Para isso foram realizados tratamentos térmicos isotérmicos com tempos de encharque distintos em amostras de aço IF a fim de obter-se distintos tamanhos de grão. Em seguida, foram realizados diversos ensaios nas amostras tratadas. Foram feitas medições de dureza rockwell B, de tamanho de grão por método do intercepto de Heyn e de condutividade elétrica pela técnica de duas pontas. Além disso, foi realizado ensaio de difração de raios x no aço como recebido. Os ensaios confirmaram o sucesso dos tratamentos térmicos no aumento dos tamanhos de grão, porém chegou-se à conclusão que a técnica de duas pontas não possui sensibilidade suficiente para indicar mudanças na condutividade elétrica causadas apenas pelo aumento do tamanho de grão.

Palavras-Chave: Condutividade elétrica; Tamanho de grão; Aços IF; Método de duas pontas.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação microestrutural de estruturas metálicas é fundamental para a garantia de sua correta operação e da segurança dos que com elas trabalham. Tendo em vista que o desempenho sob carregamento mecânico de tais estruturas é fortemente influenciado pelas características microestruturais do metal que as compõe, há necessidade de desenvolvimento de novos métodos não destrutivos que possam ser aplicados, especialmente *in situ*, com o intuito de caracterizar o material empregado.

Métodos usuais de caracterização consistem em análises convencionais de micrografia e medidas de microdureza. Esta forma de análise não só é laboriosa como também é de difícil aplicação in situ além de possuir caráter destrutivo.

A medida de condutividade elétrica (σ) se apresenta como uma alternativa viável como parâmetro de avaliação da microestrutura (Santos *et al.*, 2014; Sorger *et al.*, 2019). A condutividade elétrica é definida como a facilidade de cargas elétricas de se locomoverem no interior do material (Kittel, 2005; Hummel, 2011) e varia conforme a composição e microestrutura do mesmo (Sorger *et al.*, 2019). Portanto, um método de medição de condutividade suficientemente preciso, poderia determinar aspectos microestruturais de um certo componente com a conveniência de uma técnica não destrutiva.

Uma técnica de medição de condutividade bastante comum e de fácil utilização é a de duas pontas. Conhecendo-se com precisão as dimensões do material, é possível fazer uma medição direta de sua resistividade elétrica (ρ) aplicando-se uma diferença de potencial e medindo-se a corrente elétrica que flui pela amostra (Valdes, 1954; Girotto & Santos, 2002).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MATERIAL

Foi utilizado um aço IF (livre de intersticiais, do inglês Interstitial free) Ti-Nb fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na forma de tira com 3,80 mm de espessura média inicial cuja composição química é dada pela Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do aço em estudo

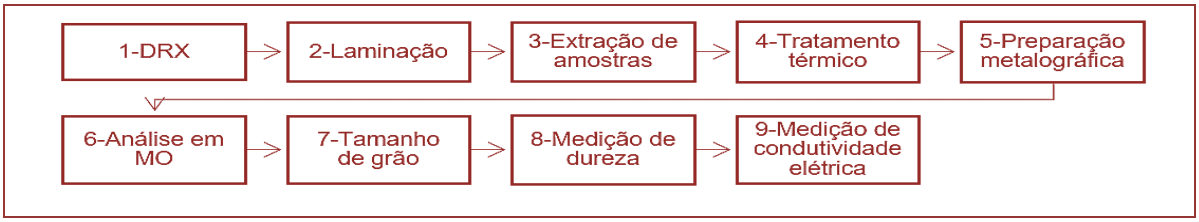
C	Mn	P	Si	Al	N	Ti	Nb
0,003	0,125	0,011	0,067	0,033	0,003	0,042	0,034

Este foi escolhido pela simplicidade de sua microestrutura, sendo o tamanho de grão o principal aspecto microestrutural com grande impacto sobre a condutividade elétrica.

2.2. MÉTODOS

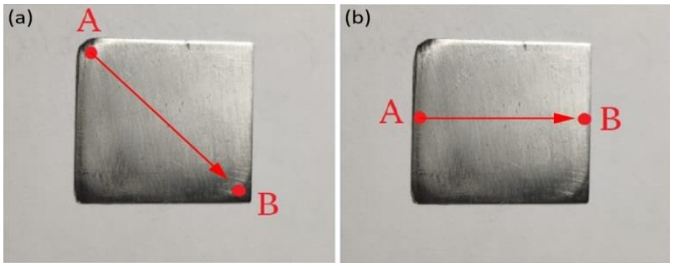
Os métodos adotados na presente pesquisa se dividiram em 9 etapas conforme resumidas na Figura 1 e detalhadas logo em seguida.

Figura 1 - Resumo dos procedimentos experimentais



1. A análise por difração de raios x (DRX) na amostra como recebida foi realizada a fim de qualificar a amostra com a fase ferrítica. A difração de raios x foi realizada no equipamento X'Pert PRO MPD, da Panalytical;
2. As laminações foram executadas por Santos (2015), com o auxílio do Laminador FENN MFG. Co., modelo D 51710 de 1973, com redução de espessura aproximada de 85%;
3. Após a laminação a frio, foram obtidas amostras com dimensões de 20 x 20 mm e 0,25 mm de espessura por meio de uma cortadora metalográfica com refrigeração Teclago, modelo CM40;
4. Cinco amostras provenientes da etapa de laminação a frio foram submetidas diferentes condições de recozimento a 900 °C por: 2,5 minutos; 5 minutos; 10 minutos; 30 minutos; e 1 hora. As amostras foram resfriadas ao ar. Através desses tratamentos buscou-se obter amostras com distintos tamanhos de grão;
5. As amostras recozidas foram submetidas à uma preparação metalográfica, que consistiu no lixamento sequencial com lixas d'água de #220, #400, #600 e #1200 seguida por polimento mecânico com suspensão de alumina de 1 µm por 4 vezes em cada amostra, intercalado por leves ataques de duração de 10 s com solução de nital 3%. O ataque final foi realizado com reagente de Klemms, composto por 50 ml de solução aquosa saturada de tiossulfato de sódio e 1g de metabissulfato de potássio por 80 s;
6. Uma vez reveladas as microestruturas foram realizadas medições de tamanho de grão pelo método de intercepto de Heyn, seguindo a norma ASTM E112;
7. As medições de dureza foram feitas com o durômetro Pantec, modelo RBS pela escala Rockwell B com pré carga de 10 kgf. O procedimento foi realizado segundo a norma ABNT NBR ISO 6508-2:2008.
8. A condutividade elétrica das amostras foi medida pela técnica de duas pontas com um multímetro da marca Keithley, modelo DMM2000. Foram realizadas 10 medições (5 paralelas à aresta e 5 ao longo da diagonal) em cada amostra com espaçamento constante de 0,01512 m a fim de obter-se um desvio-padrão. Em cada medição foram aplicadas diferenças de potencial entre os pontos A e B (Figura 2) na faixa de 0 a 250 mV com incrementos de 10 mV, sendo medidas simultaneamente as correntes resultantes. Cada medição gera um gráfico IxV (corrente vs voltagem) a partir do qual é possível realizar uma regressão linear, segundo a Equação 1, e computar o valor do inverso da resistência elétrica R.

Figura 2 - Arranjos utilizados nas medições: (a): ao longo da diagonal e (b) paralelo à aresta



$$V = R * I \rightarrow I = \frac{1}{R} * V \quad (1)$$

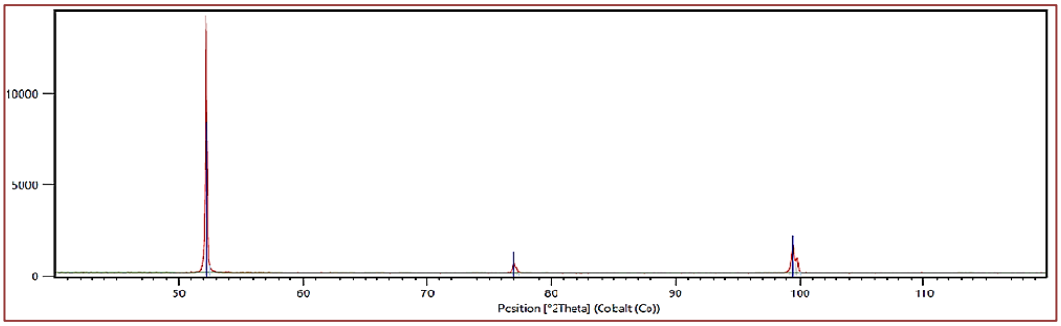
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE POR DRX

A Figura 3 exibe o difratograma obtido da amostra como recebida. Os picos identificados ocorreram em

ângulos 2θ de 55°, 77°e 99°, correspondentes aos planos cristalográficos (110), (200) e (211), respectivamente. Os planos medidos são relacionados à estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), indicando uma microestrutura unicamente composta por ferrita α.

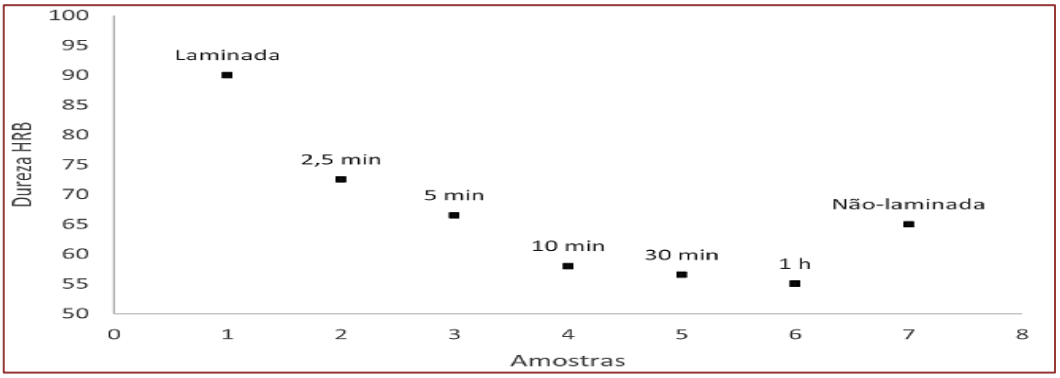
Figura 3 - Difratograma indexado da amostra como recebida



3.2. ENSAIO DE DUREZA

O gráfico ilustrado na Figura 4 mostra uma clara tendência de diminuição de dureza conforme o aumento do tempo de tratamento. Tal tendência constitui forte indicativo de que os tratamentos tiveram sucesso em produzir distintos tamanhos de grão, dado que esta propriedade é o fator predominante do comportamento mecânico de aços livres de intersticiais recozidos. Pela tendência assintótica da distribuição em altos tempos de tratamento, a amostra que foi tratada por 1 hora a 900 °C demonstra ter atingido um patamar de dureza, de forma que tratamentos térmicos com tempos mais longos na mesma temperatura de 900 °C não resultariam em variação significativa de tamanho de grão e, consequentemente, de dureza.

Figura 4 - Resultados das medições de dureza na escala Rockwell B



3.3. MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO

Por meio do método do intercepto de Heyn foram obtidos os valores de comprimento médio do intercepto, a partir dos quais é possível extrair o diâmetro médio de grão, bem como o tamanho macro de grão segundo a norma ASTM E112 (Tabela 2).

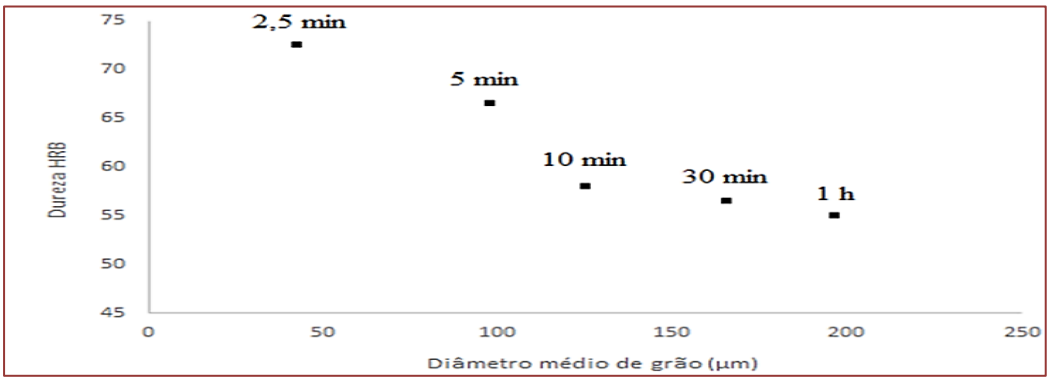
Tabela 2 - Tamanhos de grão ajustados pela norma ASTM E112

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
Comprimento médio do intercepto (μm)	38	87,5	112	148	175
Diâmetro médio de grão (μm)	42,68	98,34	125,77	166,35	196,83

Número de tamanho de grão macro	M-6.0	M-3.5	M-3.0	M-2.0	M-1.5

A Figura 4 exibe a tendência de queda na dureza com o aumento do diâmetro médio de grão para cada tempo de tratamento térmico. O gráfico apresenta tendências coerentes, com um aumento de tempo de tratamento acarretando simultaneamente um aumento no diâmetro médio de grão e uma diminuição na dureza.

Figura 4 - Dureza vs diâmetro médio de grão para os diferentes tempos de tratamento térmico



3.4. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

3.4.1. MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Foram realizadas cinco medições paralelamente a aresta e cinco medições ao longo da diagonal de cada amostra de acordo com o esquema mostrado na Figura 2. A Tabela 3 exibe os valores médios de 1/R [$(\mu\Omega)^{-1}$] correspondentes às 5 medições paralelas à aresta e ao longo da diagonal para cada amostra.

Tabela 3 - Valores médios de 1/R para cada amostra.

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
Aresta $(\mu\Omega)^{-1}$	2,063	2,133	2,168	2,134	2,029
Diagonal $(\mu\Omega)^{-1}$	2,144	2,107	2,183	2,178	2,028

A partir dos valores de 1/R é possível calcular a resistividade elétrica(ρ) (Equação 2) ou então a condutividade elétrica (σ), uma vez esta é o recíproco daquela (Equação 3).

$$\rho = \frac{R*A}{L} \qquad (2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \rightarrow \sigma = \frac{L}{R*A} \qquad (3)$$

Sendo L [m] a distância entre os pontos onde é aplicada uma diferença de potencial (neste caso mantida constante em todas as medições) e A [m] a área da seção reta da amostra. A média da condutividade elétrica, em (µΩ*m) -1, para cada amostra é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios de σ para cada amostra

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
Aresta $(\mu\Omega*m)^{-1}$	6,237	6,450	6,556	6,453	6,135
Diagonal $(\mu\Omega*m)^{-1}$	6,257	6,150	6,370	6,357	5,918

3.4.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de avaliar os resultados obtidos, foi realizado um estudo estatístico objetivando responder aos seguintes questionamentos:

1. Há diferença significativa entre os valores médios de σ medidos paralelamente à aresta e os valores medidos ao longo da diagonal? Em outras palavras: o material apresenta isotropia relativa a esta propriedade?
2. O método de medição utilizado possui resolução suficiente para que seja possível garantir que as medições obtidas sejam diferenciáveis entre si?

Para solucionar o primeiro caso foi feito um teste de hipótese bilateral no qual a hipótese nula é H_0: $\mu_1=\mu_2$, o que é equivalente a supor que não há diferença significativa entre as médias. Foi utilizada a distribuição t de Student a fim de fazer a avaliação, de forma que tcrítico (função do grau de confiança e graus de liberdade do sistema) foi comparado a um valor calculado t (função das médias e dos desvios padrão associados às medidas). Se $t \leq -t_{crítico}$ ou $t \geq t_{crítico}$, haverá elementos para rejeitar H_0. Se $-t \geq t \geq t_{crítico}$, não haverá elementos para rejeitar H_0.

Sendo assim, é necessário encontrar a propagação de erro para cálculo do desvio padrão associado à medida de condutividade. Em seguida o desvio padrão combinado ($s_{combinado}$) para o cálculo de t e por fim comparar este ao $t_{crítico}$.

Como os valores iniciais de 1/R foram apenas multiplicados por um valor constante (L/A) a fim de obter-se os valores de condutividade, a propagação de erro consiste simplesmente da multiplicação dos desvios-padrão de amostra pela mesma constante utilizada.

A Tabela 5 e a Tabela 6 exibem os valores de desvio padrão para a medida de 1/R (s_1/R), os valores de desvio padrão para os valores de condutividade após propagação de erro (s_σ) e os valores de desvio padrão combinado para os valores de condutividade ($s_{combinado}$).

Tabela 5 - Desvios-padrão relativos às medidas paralelas a aresta e desvio padrão combinado

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
S_1/R	0,0007	0,0006	0,0007	0,0003	0,0036
	0,0004	0,0009	0,0002	0,0005	0,0008
	0,0006	0,0004	0,0010	0,0006	0,0042
	0,0010	0,0009	0,0008	0,0006	0,0024
	0,0010	0,0006	0,0004	0,0004	0,0005
S_σ	2,0898	1,7969	1,9824	0,8610	10,9166
	1,2752	2,5817	0,6768	1,3776	2,3975
	1,9008	1,2503	3,0182	1,8888	12,8218
	2,9776	2,7062	2,2735	1,8841	7,3181
	3,0103	1,8792	1,2998	1,2475	1,4738
$S_{combinado}$	2,3467	2,1124	2,0177	1,5042	8,3072

Tabela 6 - Desvios-padrão relativos às medidas ao longo da diagonal e desvio padrão combinado

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
S_1/R	0,0003	0,0004	0,0004	0,0008	0,0009
	0,0003	0,0004	0,0005	0,0008	0,0002
	0,0006	0,0006	0,0004	0,0005	0,0006
	0,0008	0,0002	0,0005	0,0005	0,0002
	0,0003	0,0006	0,0004	0,0007	0,0013
S_σ	0,9585	1,0102	1,1412	2,4190	2,7174
	0,7659	1,1815	1,5465	2,2138	0,4688
	1,7139	1,6174	1,2419	1,5136	1,7571
	2,1845	0,5761	1,3085	1,5448	0,4721
	0,8152	1,7534	1,1780	2,0580	3,7063
$S_{combinado}$	1,4057	1,2991	1,2912	1,9832	2,2204

O cálculo de *t* é feito através da Equação 4, enquanto o número de graus de liberdade (ν) é dado pela Equação 5, onde N_1 e N_2 são o número de medidas, s_1 e s_2 os desvios padrão e $\overline{x_1}$ e $\overline{x_2}$ as médias amostrais.

$$t = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2}}} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_1^2}{N_1}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{N_1}\right)^2}{N_1+1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{N_2}\right)^2}{N_2+1}} - 2 \quad (5)$$

O valor de t entre as medições paralelas à aresta e ao longo da diagonal para cada amostra encontram-se representadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores de t e graus de liberdade da comparação entre medidas paralelas a aresta e ao longo da diagonal para cada amostra

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
t	0,0164	0,2707	0,1737	0,0858	0,0564
ν	7	7	8	9	4

Cruzando os valores da Tabela 7 com os da Tabela 8 fica claro que, para qualquer nível de confiança e para qualquer amostra, a relação $-t_{crítico} \geq t \geq t_{crítico}$ será válida. Portanto, não há elementos suficientes para rejeitar nossa hipótese nula H_0. Em outras palavras, não podemos afirmar que existe diferença entre as condutividades medidas paralelamente à aresta e aquelas medidas ao longo da diagonal. Isto implica que, para o nível de resolução alcançado, o material pode ser considerado isotrópico. Tendo isso em vista, as medidas paralelas à aresta e ao longo da diagonal serão utilizadas conjuntamente para a próxima etapa do estudo estatístico.

Tabela 8 - Valores de $t_{crítico}$ para diferentes níveis de confiança

Graus de liberdade	80%	90%	95%	99%
4	1,53	2,13	2,78	4,60
6	1,44	1,94	2,45	3,71
8	1,40	1,86	2,31	3,36
10	1,38	1,82	2,24	3,21
19	1,33	1,73	2,10	2,88
59	1,30	1,67	2,00	2,66
∞	1,29	1,64	1,96	2,58

Para responder a segunda questão foi realizado um procedimento análogo, adotando a hipótese nula H_0: $\mu_1 = \mu_2$, ou seja, a hipótese afirma que não há diferença significativa entre duas medições quaisquer realizadas. Caso não seja possível rejeitar H_0, concluir-se-á que o método não possui resolução suficiente para detectar variações no valor de condutividade entre as amostras testadas.

A Tabela 9 exibe a média total dos valores de condutividade bem como o desvio padrão combinado total para cada amostra.

Tabela 9 - Média total de condutividade e desvio padrão combinado total das amostras

Amostras	2,5 min	5 min	10 min	30 min	1 h
Média total $(\mu\Omega*m)^{-1}$	6,2470	6,3000	6,4630	6,4050	6,0260
$S_{combinado}$ total	1,9340	1,7540	1,6940	1,7600	6,0800

Com isso, é possível calcular o valor de *t* e o número de graus de liberdade do sistema para todos os pares de amostras. Assim, aplica-se a hipótese nula H_0 para todos os pares de amostras a fim de avaliar se para algum desses pares o valor médio de condutividade obtido é diferençável. A Tabela 10 exibe os valores de *t* para cada par de amostras, bem como o número de graus de liberdade de cada sistema.

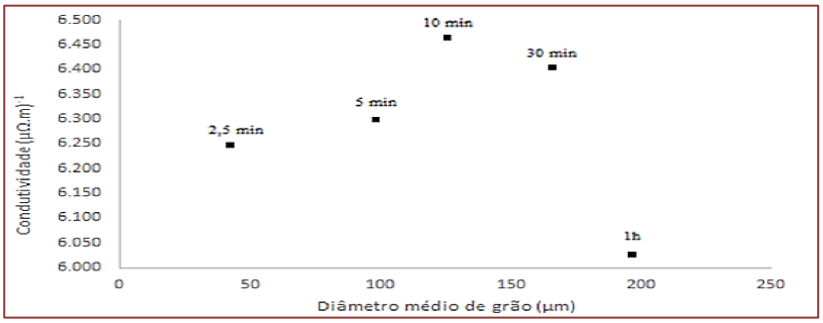
Tabela 10 - Valores de t e graus de liberdade de cada sistema de par de amostras.

Comparações	*t*	ν
2,5 min - 5 min	0,0638	19
2,5 min - 10 min	0,2657	19
2,5 min - 30 min	0,1906	19
2,5 min - 1 h	0,1096	11
5 min - 10 min	0,2119	19
5 min - 30 min	0,1335	20
5 min - 1 h	0,1368	10
10 min - 30 min	0,0757	19
10 min - 1 h	0,219	10
30 min - 1 h	0,1892	10

Comparando-se os valores obtidos na Tabela 10 com os valores de $t_{crítico}$ presentes na Tabela 8, conclui-se que, para qualquer par de amostras, a relação $-t_{crítico} \geq t \geq t_{crítico}$ será válida. Portanto, não há elementos suficientes para rejeitar a hipótese nula H_0, do que decorre que o método utilizado não possui resolução suficiente a fim de diferenciar as medições de condutividade para este conjunto de amostras.

Por fim, a Figura 5 exibe a relação entre os valores de condutividade elétrica encontrados para cada amostra e o diâmetro médio de grão. Esta não apresenta tendência de aumento da condutividade elétrica frente a um aumento do diâmetro médio de grão, como seria esperado (Santos *et al.*, 2014; Sorger *et a.l*, 2019). Possíveis explicações para isso são a baixa resolução do método utilizado e um possível encruamento excessivo introduzido pela preparação metalográfica das amostras, o que pode interferir nos resultados.

Figura 5 - Gráfico de condutividade vs diâmetro médio de grão para diferentes tempos de tratamento térmico



4. CONCLUSÃO

Foi possível, por meio de tratamento térmico, obter cinco amostras com tamanhos de grão significativamente distintos. Enquanto as medições de dureza seguiram uma tendência coerente frente ao aumento do tamanho de grão, não foi possível obter uma tendência coerente com relação às medições de condutividade. A baixa resolução do método e eventual encruamento introduzido na preparação metalográfica das amostras podem ter causado a disparidade na tendência.

Frente ao tratamento estatístico dado aos resultados das medições de condutividade, foi possível concluir que a técnica de duas pontas não possui resolução suficiente a fim de detectar mudanças na condutividade elétricas de aços IF diferindo apenas pelo tamanho de grão. Visto que o aço IF é monofásico pode-se afirmar que o tamanho de grão é o fator preponderante em eventual mudança de condutividade elétrica com os tratamentos térmicos, portanto afirma-se que a variação da condutividade elétrica de aços devida exclusivamente à influência da mudança de tamanho de grão não pode ser detectada de forma confiável pelo método de duas pontas. Outros métodos mais precisos, como a técnica de quatro pontas, possuem o potencial de solucionar tal problema (Sorger *et a.l*, 2019).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a bolsa de doutorado subsidiada pelo CNPQ vinculada ao PPGCM/SE8-IME, ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) pelo suporte ao equipamento de medida de 2 pontas e, ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e apoio laboratorial prestado na execução do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] Girotto, E. M.; Santos, I. A. (2002). “Medidas de resistividade DC em sólidos: como efetuá-la corretamente”. Química nova, v. 25, p. 639-647.

[2] Hummel, R. E. (2011). “Electronic properties of materials”. [S.l.]: Springer Science & Business Media.

[3] Kittel, C. (2005), “Introduction to Solid State Physics”. 8. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc..

[4] Santos, T. G.; Sorger, G.; Vilaça, P.; Miranda, R. (2014). “A non-conventional technique for evaluating welded joints based on the electrical conductivity”. In: TRANS TECH PUBL. Key Engineering Materials. [S.l.], v. 611, p. 671–676.

[5] Santos, I. C. dos. (2015). “Modelo computacional de previsão de embutibilidade em um aço livre de intersticiais”. 126 p. Mestrado em Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

[6] Sorger, G., L.; Oliveira, J.P.; Inácio, P.L.; Vilaça, P.; Miranda, R.M.; Santos, T.G. (2019). “Non-destructive microstructural analysis by electrical conductivity: Comparison with hardness measurements in different materials”. Journal of Materials Processing Technology, 2019, v.35, p. 360-368.

[7] Valdes, L. B. (1954). “Resistivity Measurements on Germanium for transistors”. Proceedings of the IRE, 1954, v. 42, p. 420-427.

Capítulo 7

Determinação de propriedades físicas e mecânica de compósitos poliméricos incorporados com resíduo (lama vermelha) do beneficiamento da bauxita

Dorivane Cohen Farias
Nayla Gonçalves da Silva
Alessandro José Gomes dos Santos
André Wilson da Cruz Reis
Ana Carolina Ramos da Silva
Deibson Silva da Costa
Larissa Tavares Esquerdo
Gabriel da Silva Gomes

Resumo: O desenvolvimento de novas tecnologias visando à reinserção de sólidos e rejeitos industriais é uma alternativa viável, pois, além de contribuir com a preservação ambiental apresentam uma possibilidade de reutilização nas indústrias. Neste trabalho foram produzidos materiais compósitos de matriz polimérica incorporados com lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % para determinação de propriedades físicas e de tração. A matriz polimérica utilizada foi à resina poliéster isoftálica além dos agentes de cura que são o acelerador de cobalto e catalisador. A lama vermelha foi fornecida pela empresa Hydro Alunorte, peneirada em 100 mesh e o produto passante foi utilizado para confeccionar os compósitos. Os compósitos seguiram o processo de fabricação manual (*Hand Lay-Up*). O ensaio físico foi realizado conforme a norma ASTM, 1984-92. As propriedades mecânicas de tração foram determinadas de acordo com a norma ASTM D3039. Os resultados do ensaio físico demonstraram que os compósitos apresentaram uma tendência de aumento na PA, AA e MEA à medida que aumentava a proporção de resíduo na matriz. O material que apresentou melhor limite de resistência à tração foi o qual continha a proporção de 20 % de resíduo, com um limite de 36,63 MPa.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de materiais compósitos encontra-se voltado à sustentabilidade, de preferência que estes sejam oriundos da natureza, que não provoque impactos ambientais, ou ainda que tenham origens de sólidos ou rejeitos industriais, o que torna justificável sua aplicação na indústria (QUIRINO, 2010).

O uso de cargas minerais em compósitos surge da necessidade de viabilizá-los e torna-los economicamente atrativo dentro das indústrias, seu uso em compósito é justificado principalmente por contribuir com a preservação ambiental, uma vez que, esses pós são materiais difíceis de ser decompor (SANTOS, 2007).

O desempenho de uma carga mineral na fabricação de compósitos depende de vários fatores como granulometria, superfície, relação de aspecto e de propriedades mineralógicas como: estrutura cristalina, propriedades ópticas, hábitos, clivagem, dureza, densidade, composição química, brilho, cor e propriedades físico-químicas de superfície (LIMA, 2007).

Neste trabalho foram desenvolvidos materiais compósitos poliméricos incorporados com resíduo (lama vermelha) proveniente do processo bayer nas proporções de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % para determinação de propriedades físicas e de tração.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. MATERIAIS UTILIZADOS NA ELABORAÇÃO DA MATRIZ

Os materiais sintéticos utilizados na elaboração da matriz foram: resina poliéster isoftálica, acelerador de cobalto e catalisador. A resina poliéster Isoftálica apresentou propriedades como: baixa viscosidade, média reatividade, coloração amarelada, ausência de promotor de reticulação e boa resistência química. O acelerador de Cobalto foi o produto comercial denominado CAT MET UMEDECIDO 1,5 % (Solução de Octoato de cobalto 1,5 %). Como catalisador utilizou-se o produto comercial BUTANOX M-50 (Peróxido de metil etil cetona [MEK-P]).

2.2. PROCEDIMENTOS APLICADOS AO RESÍDUO

A lama vermelha foi fornecida pela empresa Hydro Alunorte e passou por algumas etapas até alcançar a granulometria adequada. Primeiramente, realizou-se a fragmentação do resíduo no moinho de bolas, após, o mesmo foi levado à estufa para secagem, onde permaneceu em temperatura de 120 °C durante um período de 48 horas. Posteriormente o resíduo foi peneirado manualmente em peneira de 100 mesh, o produto passante foi utilizado na confecção dos compósitos. A Figura 1 mostra o resíduo utilizado.

Figura 1: Lama vermelha utilizada na produção dos compósitos

2.3. CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS

O método aplicado na confecção dos compósitos com incorporação de 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de lama vermelha foi o método manual (*Hand Lay-Up*). Primeiramente realizou-se a determinação das massas da resina e do resíduo, seguido pela determinação do volume do acelerador de cobalto e do catalisador. Após, colocou-se o resíduo durante 15 minutos na estufa em temperatura de 105 °C para retirada de umidade. Em um recipiente misturou-se a resina, o acelerador de cobalto, o resíduo e o catalisador, despejou-se a

mistura no molde metálico e prensou na com uma carga de 25 kN durante 20 minutos. Após o desmolde o material ficou em processo de cura durante 24 horas. Com as placas confeccionadas, realizou-se os cortes para obtenção das dimensões específicas para o ensaio físico e para o ensaio de tração. A Figura 2 mostra o material antes de passar pelas etapas de cortes.

Figura 2: Compósito produzido

3. ENSAIO FÍSICO

O ensaio físico foi realizado com o objetivo de determinar as seguintes propriedades físicas do material:

- Porosidade Aparente (PA (%));
- Absorção de Água (AA (%));
- Massa Específica Aparente (MEA (g/cm^3)).

Para determinar as propriedades físicas, à metodologia adotada foi à citada por Santos (1989) e a estabelecida na norma ASTM, 1984-92.

A porosidade aparente foi determinada pela Equação 1:

$$PA\ (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_U - M_i)}\ X\ 100 \quad (1)$$

Onde: M_U é a massa úmida (g), M_S é a massa seca (g), e M_i é a massa imersa (g).

A absorção de água foi determinada pela Equação 2:

$$AA\ (\%) = \frac{(M_U - M_S)}{(M_S)}\ X\ 100 \quad (2)$$

Onde: M_u é a massa úmida (g) e M_s é a massa seca (g).

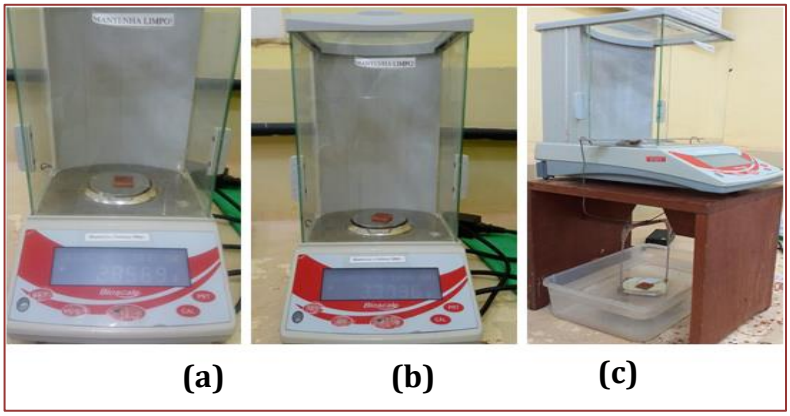
A massa específica aparente foi determinada através da Equação 3:

$$MEA\ \left(\frac{g}{cm^3}\right) = \frac{(M_S\ x\ \rho_L)}{(M_U - M_i)} \quad (3)$$

Onde, M_U é a massa úmida (g), M_s é a massa seca (g), e M_i é a massa imersa (g) e ρ_L é a massa específica da água (g/cm^3).

Após a confecção dos compósitos, os mesmos foram cortados nas dimensões de 25x25 mm. Foram produzidos um total de 8 (oito) corpos de prova para cada série fabricada. Após a confecção os corpos de prova foram colocados em um recipiente e levados à estufa, onde, permaneceram por 24 h em temperatura de 105 °C. Após, foram determinadas a massa de sólido seco na balança de precisão, marca: Bioscale, modelo: FA 2204 com precisão de: ≤ ±0.2 mg. Para a determinação da massa úmida, os corpos de prova foram imersos em um recipiente com água onde permaneceram por 24 horas, após foram removidos do recipiente, retirado o excesso de água e determinado a massa úmida. Na sequência a balança foi colocada em um aparato de madeira e anexada a uma haste de aço juntamente com um suporte onde é colocado o corpo de prova para determinar a massa imersa, uma vez que este está mergulhado em um recipiente com água suficiente para cobrir o corpo de prova. A Figura 3 mostra os procedimentos aplicados na determinação da massa seca, da massa úmida e da massa imersa.

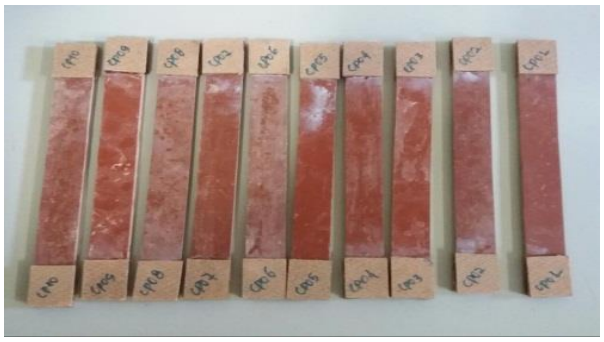
Figura 3: (a) massa seca, (b) massa úmida (c) massa imersa



4. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM D3039, os corpos de prova para o ensaio adotaram as seguintes dimensões: 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2,5 mm de espessura. Sendo confeccionados 10 corpos de prova para cada série. A Figura 4 mostra os corpos de prova confeccionados.

Figura 4: Corpos de prova



5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ENSAIO FÍSICO

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos no ensaio físico da porosidade aparente (PA), absorção de água (AA) e da massa específica aparente (MEA) dos compósitos poliméricos incorporados com lama vermelha nas proporções de 10 %, 20 % 30 % e 40 %.

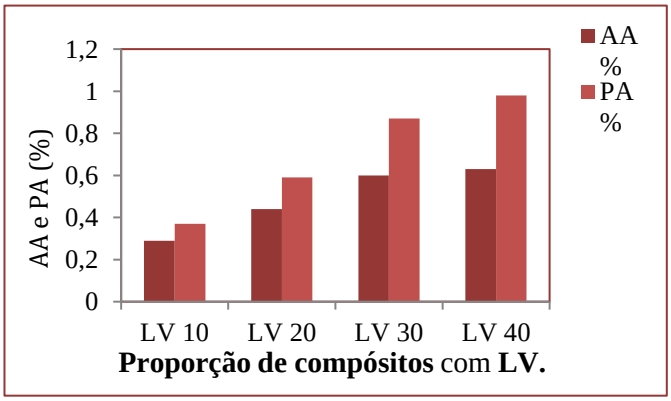
Tabela 1: Resultados obtidos no ensaio físico

Fração Mássica (%)	PA (%)	AA (%)	MEA (g/cm^3)
10 %	0,37	0,29	1,27
20 %	0,59	0,44	1,36
30 %	0,87	0,60	1,45
40 %	0,98	0,63	1,55

Os resultados mostram que ocorre um gradativo aumento na PA, AA e MEA à medida que aumenta a proporção de resíduo na matriz polimérica, efeito este que pode ser justificado pelo aumento bolhas, vazios, dentre outros mecanismos originados devido ao excesso de resíduo na matriz. De acordo com Costa (2016) o aumento da PA, bem como a AA e MEA podem ser justificados ainda devido à lama vermelha apresentar um alto teor hidrofílico, o que segundo o autor, resulta em uma alta probabilidade de aumento de vazios, bolhas e defeitos, ao inserir este resíduo em compósitos.

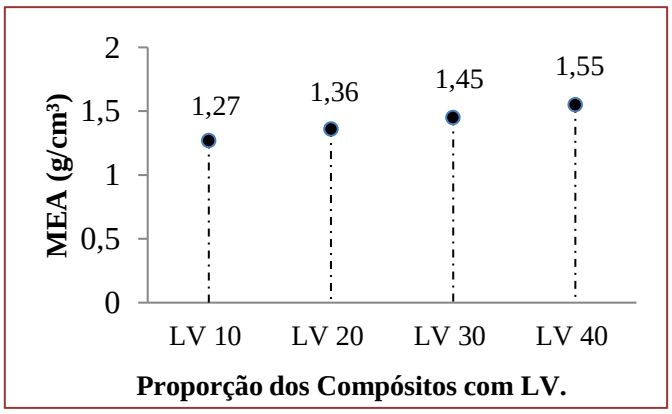
A Figura 5 mostra o gráfico com os resultados obtidos da AA e PA dos compósitos em relação às proporções de lama vermelha na matriz.

Figura 5: Comportamento de AA e PA em relação à proporção de resíduo



Na Figura 6 mostra o gráfico o comportamento da MEA dos compósitos em relação à proporção de resíduo na matriz.

Figura 6: Comportamento da MEA em relação à proporção de resíduo



5.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

A resistência dos compósitos foi analisada através do ensaio de tração e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos no ensaio de tração dos compósitos incorporados com lama vermelha

Fração Mássica (%)	Res. Tração (MPa) (Desv. Padrão)	Along.(mm)
10 %	33,00 (± 5,05)	4,50
20 %	36,63 (± 1, 91)	5,27
30 %	32,27 (± 2,02)	4,89
40 %	29,01 (± 1,94)	4,25

Os resultados do ensaio de tração mostram que houve um aumento na resistência à tração do compósito de proporção de 10 % de lama vermelha para a proporção 20 %, seguindo a análise, notou-se uma progressiva diminuição no limite de resistência dos compósitos à medida que aumentou à proporção da carga mineral na matriz. As diminuições na resistência com o aumento da carga mineral podem ser justificadas por surgimentos de falhas, defeitos oriundos dos processos de fabricação, ou até mesmo, devido o resíduo se comportar como a matriz.

6. CONCLUSÃO

A metodologia (*Hand Lay-Up)* aplicada na confecção dos compósitos mostrou-se adequada, uma vez que o material apresentou um processo de cura aceitável para a produção dos corpos de prova para os ensaios físicos e de tração.

As propriedades físicas de PA, AA e MEA dos compósitos com incorporação de lama vermelha aumentaram significativamente como o aumento do resíduo na matriz.

O material compósito incorporado com lama vermelha que apresentou melhor desempenho de resistência à tração foi o compósito com incorporação de 20 % de resíduo, com um limite de 36,63 MPa.

REFERÊNCIAS

[1] ASTM D1984 - 1969 (1992) e1, "Standard Specification for Tall Oil Fatty Acids", ASTM International, West Conshohocken, PA, 1992.

[2] ASTM D 3039 – 08, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic (Metric)”. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, EUA, 2005.

[3] COSTA, D. S. da. Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais. 2016. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2016.

[4] LIMA, A. B. T. Aplicações de Cargas Minerais em Polímeros. 2007. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

[5] QUIRINO, M. G. Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (Euterpe precatória). 2010. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

[6] SANTOS, E. A. dos. Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais. 2007. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

[7] SANTOS, P. S, Ciência e tecnologia de argilas. 2.ed. Edgard Blücher, 408 p. v. 1, 1989.

Capítulo 8

Análise comparativa do comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva e sisal

Francisco Elton Cesar Junior
João de Almeida Melo Filho

Resumo: O estudo em pauta procurou avaliar e comparar o desempenho mecânico de compósitos cimentícios utilizando duas fibras naturais de origens e meios de extração distintas utilizadas como reforço, como alternativa às fibras sintéticas, além de comparar o desempenho mecânico de compósitos com diferentes teores de uma mesma fibra. Em determinadas placas, o cimento Portland presente na matriz cimentícia foi substituído por 40% em massa por metacaulinita para produzir uma matriz livre de hidróxido de cálcio. Foram produzidas 5 placas com diferentes configurações onde se acrescentou fibras longas e unidirecionais em 3 camadas, com adição de superplastificante para reduzir o fator a/c e empregar maior resistência ao compósito, além de melhor dispor as fibras na matriz. A caracterização mecânica destes compósitos foi analisada com base nos resultados obtidos do ensaio de flexão em 4 pontos das 5 placas, nos quais foram comparados os desempenhos mecânicos entre compósitos com variação no teor volumétrico de fibras de malva (4, 6 e 8%) e entre compósitos com reforço de fibras de malva e de sisal (teor de 4%). Os resultados alcançados permitiram conceber que a fibra de malva propicia picos maiores de maior resistência mecânica ao compósito como reforço, enquanto que a fibra de sisal permite maior ductilidade. Na investigação quanto a influência do teor de fibra, o compósito com volume de 6% de fibra de malva apresentou melhores propriedades mecânicas que os demais; o compósito com teor de 8% apresentou desempenho inusitadamente inferior ao esperado.

Palavras-Chave: compósitos cimentícios, fibras de malva, fibras de sisal, reforço estrutural, resistência mecânica.

1. INTRODUÇÃO

A flora brasileira possui uma grande variedade de recursos naturais presentes em seu ecossistema. A partir de uma exploração sustentável, a versatilidade dos seus bioprodutos nos permite a obtenção de novos materiais sem impactar negativamente o meio. Uma opção é a extração e desenvolvimento de um material que possua propriedades semelhantes às fibras sintéticas como reforço estrutural.

Tratando-se de tecnologia sustentável, os compósitos reforçados com fibras naturais são um dos mais promissores na engenharia. As vantagens deste tipo de material vão além da melhoria no desempenho mecânico, estendendo-se aos fatores ambientais, como redução na emissão de poluente e biodegradabilidade, e fatores energéticos, como melhor aproveitamento de energia e menor dependência de fontes não-renováveis. Outro fator importante a se destacar é o baixo custo de produção das fibras, o que torna muito viável trabalhar com este tipo de material (ARDANUY *et al*, 2015).

Na região amazônica, a fibra de malva pode ser encontra comercialmente na forma de tecido ou de sacarias e possui bom comportamento à tração quando disposta em filamentos longos e contínuos (OLIVEIRA, 2013). Da mesma forma, a fibra de sisal, originária da região Nordeste, possui propriedades mecânicas semelhantes a malva e seu processo industrial visa sua transformação em cordas a fim de serem comercializadas (FILHO, 2012). Uma das principais diferenças dentre estas plantas é a forma de extração das fibras: enquanto a da juta é extraída entre a casca e o talo interno (maceração), a do sisal é extraída diretamente da folha (ARDANUY, CLARAMUNT e FILHO, 2015).

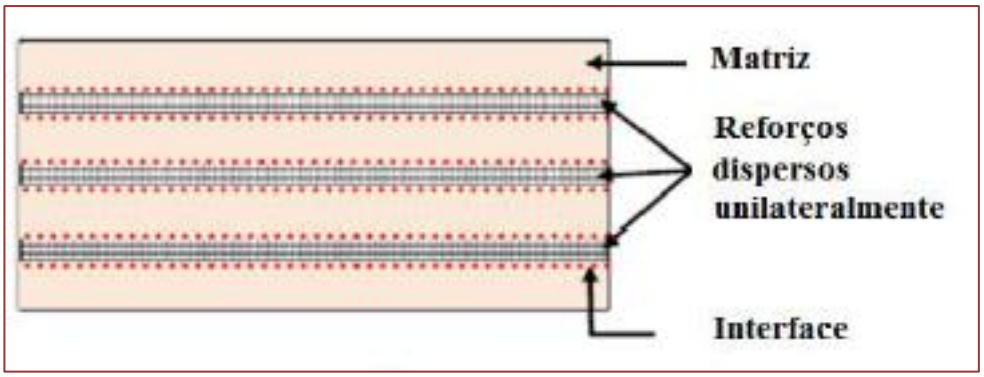
Dessa forma, esta pesquisa visa o desenvolvimento e caracterização de compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva e de sisal a fim de realizar um breve comparativo quanto ao desempenho mecânico dos mesmos, por meio de ensaios de resistência à tração por flexão, além de abordar de forma mais aprofundada o comportamento mecânico do compósito com fibra da região Amazônica. Tendo em vista que a matriz de cimento acelera o processo de degradação das fibras, cerca de 40% da sua massa total foi substituída por metacaulinita com o intuito de se produzir uma matriz livre de hidróxido de cálcio. A caracterização das amostras e os ensaios mecânicos previstos foram realizados nos laboratórios da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

2.1. MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS NATURAIS

A matriz de um compósito cimentício é um composto formado pela mistura de cimento, agregado e água, formando uma pasta de consistência plástica, podendo ser moldadas em formas. Num compósito, é ela quem exerce o principal papel de suportar os esforços, além de prover proteção e ancoragem às fibras e transmitir os esforços mecânicos. Ao se adicionar fibras na matriz cimentícia, verifica-se, nas suas propriedades, mudanças consideráveis, como aumento da resistência. Os efeitos da adição das fibras são mais evidentes após a fissuração da matriz. Depois desse estágio, percebe-se que o compósito apresenta um comportamento mais rígido ao invés da ruptura brusca que ocorreria na ausência dessas fibras longas (FILHO, 2012, e VEIGA, 2014).

Figura 1 - Arranjo esquemático de um compósito



Fonte: ASHIK *et al*. 2015.

Para composição de matrizes cimentícias o principal aglomerante é o cimento Portland, porém, esta matriz quando hidratada possui uma alta alcalinidade oriunda da Portlandita (hidróxido de cálcio) liberada, ocorrendo a presença de álcalis solúveis. Fibras naturais expostas em meios alcalinos se degradam rapidamente, decorrente principalmente da portlandita. Para minimizar esse componente, são adicionados teores de adições minerais que irão proporcionar reações pozolânicas na matriz diminuindo assim o teor de portlandita e, consequentemente, a maior durabilidade das fibras naturais no interior dessas matrizes (ARDANUY *et al*, 2015).

2.1.1. FIBRA DE MALVA E DE SISAL

A produção da malva se iniciou logo após a da juta, a partir do declínio do ciclo da borracha, como uma alternativa econômica para os trabalhadores ribeirinhos gerarem capital. Esta espécie característica do Pará foi classificada pelos ribeirinhos como uma erva daninha e, logo em seguida, reconhecida como uma fibra por conta de suas propriedades similares com as da juta (HOMMA, 2010). A fibra de sisal é uma das quatro mais utilizadas dentre as fibras vegetais e se tornou promissora devido ao seu baixo custo e disponibilidade (SATYANARAYANA, 1986 *apud* FILHO, 2012).

As fibras de malva extraídas artesanalmente das hastes longilíneas são usadas como matéria-prima sobretudo para a confecção de sacaria para café e batata, pois é capaz de controlar a umidade desses produtos. A produção das fibras tem sido valorizada por conta da sustentabilidade de sua cadeia produtiva, por serem naturais, portanto, biodegradáveis e obtidas sem insumos químicos, elas são uma alternativa ecológica para a confecção de embalagens e sacarias (OLIVEIRA, 2013).

Em relação a algumas propriedades mecânicas e microestruturais típicas dessas fibras naturais, de acordo com Oliveira (2013, a malva apresenta resistência à tração entre 300 e 500 MPa e módulo de elasticidade de 30 MPa, aproximadamente, enquanto que o sisal demonstrou resistência superior a 500 MPa e módulo de elasticidade entre 10~20 MPa, como mostram Melo Filho (2012) e Toledo *et al* (2015). A fibra de malva apresenta diâmetro médio de 0,08(+-0,016) mm enquanto que a fibra de sisal possui diâmetro de cerca de 0,2 a 0,5 mm (FILHO, SILVA, *et al.*, 2009; FILHO, 2012; OLIVEIRA, 2013).

Figura 2 - Fibras longas de malva após extração e coleta

Fonte: elaborado pelos autores

2.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

De acordo com Romão (2003) e Velasco (2008), o comportamento mecânico dos compósitos é influenciado por características inerentes ao reforço, como o tipo e geometria da fibra, fração volumétrica, módulo de elasticidade e resistência da fibra. A forma como as fibras são dispostas no interior da matriz também influencia as propriedades mecânicas do compósito. O mecanismo de transferência de tensões em matrizes fissuradas influenciará a resistência e a deformação última do compósito, assim como seu modo de ruptura. Também é necessário haver uma adesão entre a interface fibra/matriz otimizar a transmissão dos esforços para as fibras, portanto, faz-se necessário algum tratamento prévio para melhor compatibilidade.

São diversos os modos de disposição da fibra no compósito e depende da forma de aplicação e do método de fabricação do compósito, o qual pode angariar em diferentes conclusões acerca do comportamento mecânico do compósito. Significativamente, resultados alcançados demonstram que compósitos reforçados com fibras curtas de sisal possuem desempenho mecânico inferior aos reforçados com fibras longas (FILHO, 2012, e VEIGA, 2014).

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS EMPREGADOS

O aglomerante utilizado neste trabalho foi o cimento Portland (CP) CEMEX comum do tipo CP I – 40 – S, que possui baixo teor pozolânico (< 5%). Como adição mineral, foi empregada a metacaulinita regional. Esta adição foi produzida em laboratótrio através da calcinação da argila (obtida no Km 45 da BR-174) a 700°C por duas horas para que se tornasse reativa, segundo metodologia empregada por Melo Filho (2012) e Cavalcante (2017).

Figura 3 - Mufla utilizada para calcinação da argila caulinítica

Fonte: elaborado pelos autores

O agregado miúdo utilizado foi uma areia regional obtida comercialmente e sua massa específica e granulometria foram determinadas com auxílio das normas NM 52:2009 e NM 248:2003, respectivamente, e o material utilizado foi o passante na peneira de abertura 0,3mm (#48 mesh). As fibras de malva foram adquiridas por meio de doação de uma associação de agricultores localizada no município de Iranduba – AM e as fibras de sisal a serem utilizadas são as mesmas que se encontram na pesquisa de Melo Filho (2012). As duas fibras, malva e sisal, foram caracterizadas por Oliveira (2013) e Melo Filho (2012), respectivamente, e a massa específica encontrada para ambas foi de aproximadamente 0,9 g/cm^3.

3.2. CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS E ENSAIOS MECÂNICOS REALIZADOS

A metodologia seguida foi adaptada dos trabalhos realizados por Melo Filho (2012) e Cavalcante (2017). Para a dosagem da argamassa preparada para este trabalho, adotou-se o traço de 1:1:0,4 (cimento, areia e água), com o teor do superplastificante (SP) Glenium® 51 (redução da quantidade de água) estabelecido com os resultados do ensaio de *mini-slump*, tendo seu procedimento adaptado do trabalho de Tan *et al* (2017). Os compósitos de fibras de malva foram produzidos em volume de fração de 4, 6 e 8% (4M, 6M e 8M), enquanto que a fração de sisal foi de 4% (4S). Também foram confeccionados compósitos sem adição mineral (M0) e com substituição parcial de metacaulinita (MK). Na Tabela 1 encontram-se as matrizes e suas nomenclaturas para as 6 diferentes configurações dos compósitos produzidos:

Tabela 1 - Nomenclatura e configurações dos compósitos

Matriz				Compósito			
				Fibra de malva		Fibra de sisal	
Nome	Mk(%)	Cp(%)	Sp(%)	Nome	Teor (%)	Nome	Teor (%)
M0	0	100,0	1,0	M04m	4,0	-	-
M1k	40,0	60,0	1,0	M1k4m	4,0	M1K4S	4,0
				M1k6m	6,0		
				M1k8m	8,0		

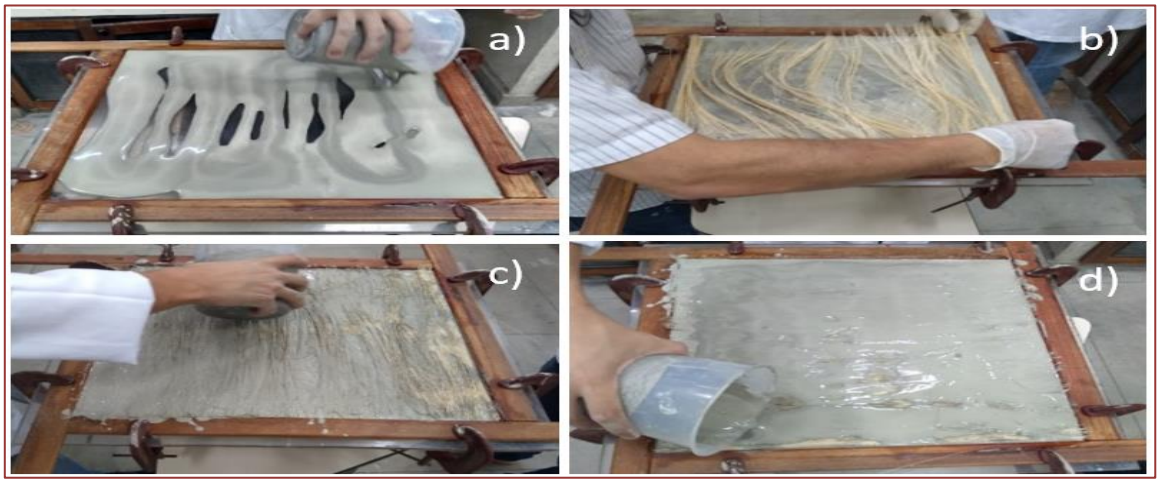
Fonte: elaborado pelos autores.

A seguir é explicitada a identificação de cada uma das configurações de compósito apresentadas na Tabela 2:

- M04M – compósito sem metacaulinita com 4% de teor de fibra de malva;
- M1K4M – compósito com metacaulinita com 4% de teor de fibra de malva;
- M1K6M – compósito com metacaulinita com 6% de teor de fibra de malva;
- M1K8M – compósito com metacaulinita com 8% de teor de fibra de malva;
- M1K4S – compósito com metacaulinita com 4% de teor de fibra de sisal;

Para a confecção das placas cimentícias, substituiu-se 40% de massa de cimento por metacaulinita. Utilizaram-se placas laminadas de acrílico (40 x 40 x 1 cm) para moldagem das matrizes com fibras longas distribuídas em 3 camadas e em direção única para atuar como um reforço unidirecional. A Figura 4 a seguir ilustra as etapas de confecção dos compósitos.

Figura 4 - Produção das placas cimentícias



Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme ilustra a figura 4, produziram-se cada uma das placas nas seguintes etapas:

a) Dispersão da 1ª camada de aglomerante;

b) Distribuição da camada das fibras naturais;

c) Repetição dos procedimentos anteriores até atingir 3 camadas;

d) Finalização do compósito;

Após isso, as placas foram colocadas em processo de cura por 28 dias e, então, foram divididas em amostras menores (18 x 5 x 1 cm) para serem submetidas ao ensaio de flexão à 4 pontos. Este ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaios Osvaldo Frizola, modelo AME, conforme mostra a figura 5, com célula de carga 5 kN e velocidade de deformação de 0,5mm/min, padronizada para todos os ensaios. Os resultados obtidos foram expressos em tensão de tração à flexão (MPa), de acordo com a equação 1 e a tenacidade (KJ/m^2) foi determinada pela equação 2.

$$\sigma = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{(eq. 1)}$$

$$T = \frac{A}{bd} \quad \text{(eq. 2)}$$

Onde:

P - carga aplicada (N);

L - comprimento da amostra (cm);

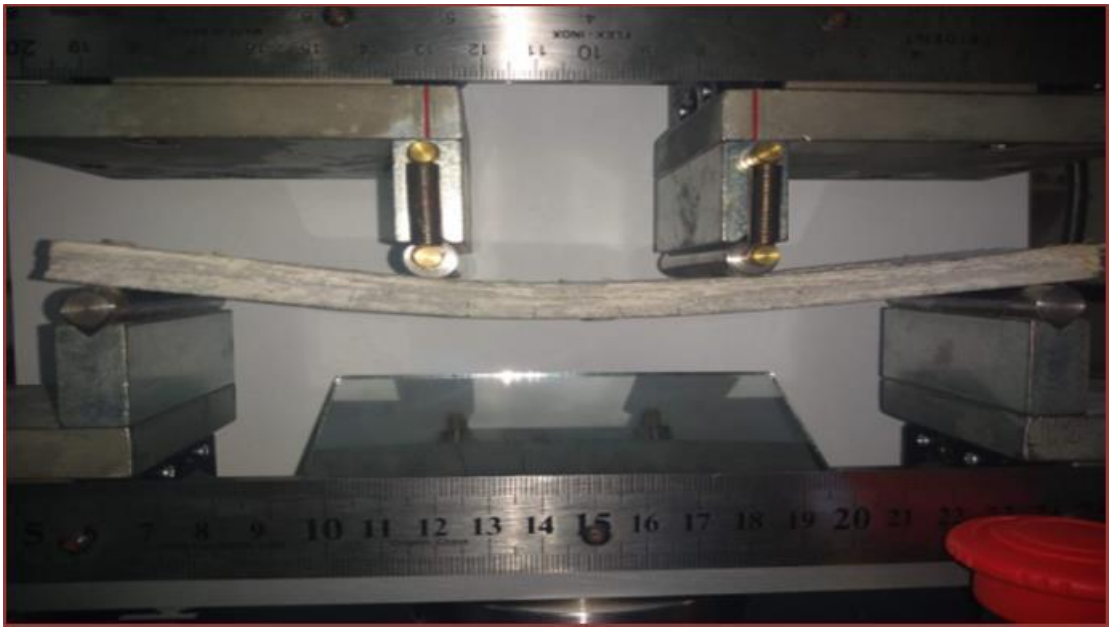
b - largura da amostra (cm);

d - espessura da amostra (cm;)

I - momento de inércia (cm^4);

A - área abaixo do gráfico tensão x deformação;

Figura 5 - Ensaio de flexão a 4 pontos



Fonte: elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Através do ensaio de fluorescência de raio – X, constatou-se que o somatório das porcentagens de alguns dos principais componentes das duas argilas (SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3) era maior que 70%, uma das exigências da NBR 12653:2014. O cimento caracterizado quimicamente pelo mesmo possui teor de trióxido de enxofre (SO_3) foi 2,727% e o teor de óxido de magnésio (MgO) foi 0,278% , dentro do exigido pela NBR 5732:1991. A massa específica encontrada da areia é de aproximadamente 2,4 g/cm^3 e possui módulo de finura de cerca de 1,79, sendo classificada como uma areia fina, sendo esta granulometria ideal para compósitos cimentícios.

4.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS COMPÓSITOS SOB TRAÇÃO A FLEXÃO

As curvas de tensão x deformação podem ser subdivididas em 5 regiões características, conforme a figura 6:

a) Região I: o compósito apresenta comportamento linear elástico; pode ser obtida a tensão de primeira fissura (σ_1).

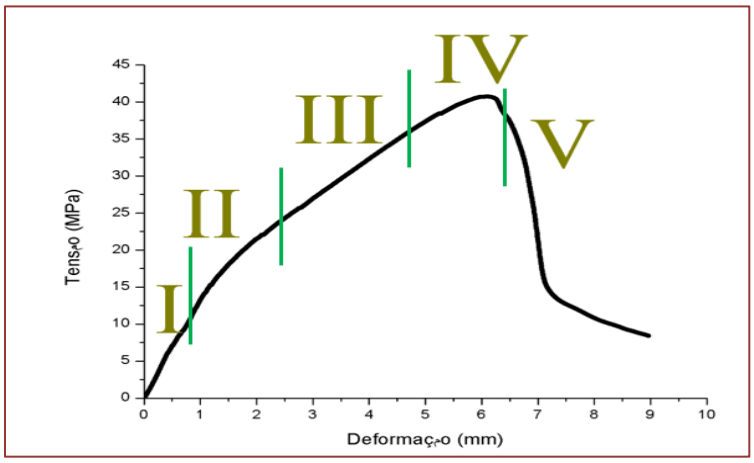
b) Região II: formação de múltiplas fissuras e redução do módulo de rigidez;

c) Região III a abertura dessas fissuras aumenta gradativamente e novas fissuras passam a surgir. Predomina a resistência da fibra à tensão aplicada.

d) Região IV: curva côncava onde ocorre no seu pico a tensão última ou tensão de ruptura (σ_r), que é a máxima tensão pós fissuração.

e) Região V: decréscimo de tensão e decaimento da curva na região; abertura das múltiplas fissuras até que uma delas abra predominantemente.

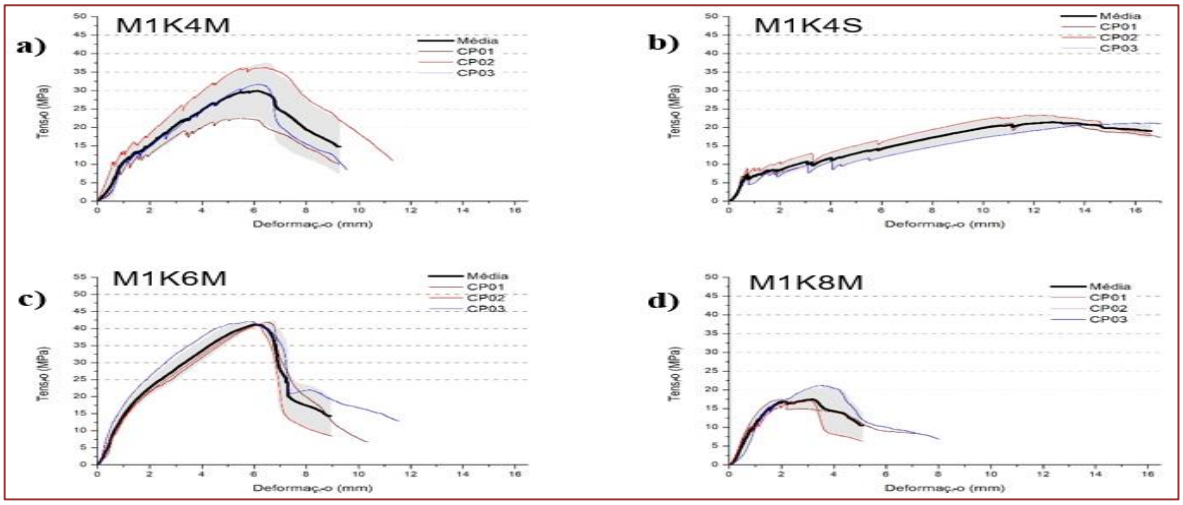
Figura 6 - Curva típica de tensão x deformação para compósitos reforçados com fibras de malva



Fonte: elaborado pelos autores.

As curvas de tensão x deformação, elaboradas com os resultados do ensaio de flexão a 4 pontos, estão apresentadas na figura 7 para quatro diferentes configurações, onde foram realizadas três repetições para cada tipo, ou seja, três amostras de cada placa. Foram escolhidas as curvas cujas amostras possuíam menos irregularidades e a geometria mais plana possível.

Figura 7 - Curvas de tensão x deformação obtidas do ensaio de flexão a) M1K4M; b) M1K4S; c) M1K6M; d) M1K8M



Fonte: elaborado pelos autores

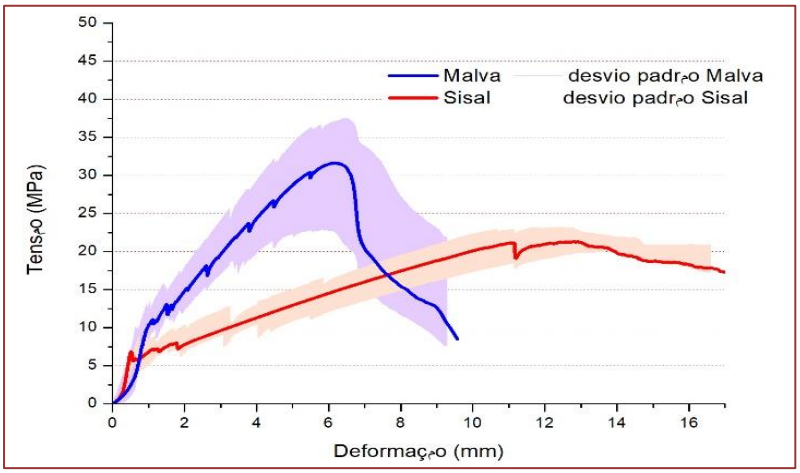
Os gráficos foram construídos com uma curva de "tensão média" (linha escura espessa) obtida a partir das médias das tensões em um ponto de deformação que elas têm em comum, além de um gráfico de área de dispersão construído com base no desvio-padrão das tensões em cada ponto, com o intuito de ilustrar a regularidade dos dados obtidos. Para efeitos comparativos, como serão demonstrados a seguir, foram utilizados os valores em módulo da curva mais próxima da curva de "tensão média". Observa-se que todas as amostras de cada uma das configurações apresentam um comportamento semelhante até a tensão de ruptura, com exceção da M1K8M, a qual demonstrou uma maior distinção da curva de tensão média.

Para os procedimentos de análise de resultados que virão em sequência, foram selecionadas as amostras cujos gráficos mais se aproximaram da curva de "tensão média" de tensão x deformação, que fora representada na figura 7

4.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO MECÂNICO DOS REFORÇOS DE FIBRA DE MALVA E FIBRA DE SISAL

As curvas de tensão x deformação para os compósitos M1K4M e M1K4S (4% de teor de fibra) são mostradas na figura 8 a seguir:

Figura 8 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos M1K4M e M1K4S



Fonte: elaborado pelos autores

Os valores das propriedades obtidas em cada região da curva com maior tendência à curva de tensão média estão explicitados na Tabela 2:

Tabela 2 - Valores médios de tensão de primeira fissura e ruptura e tenacidade dos compósitos M1K4M e M1K4S

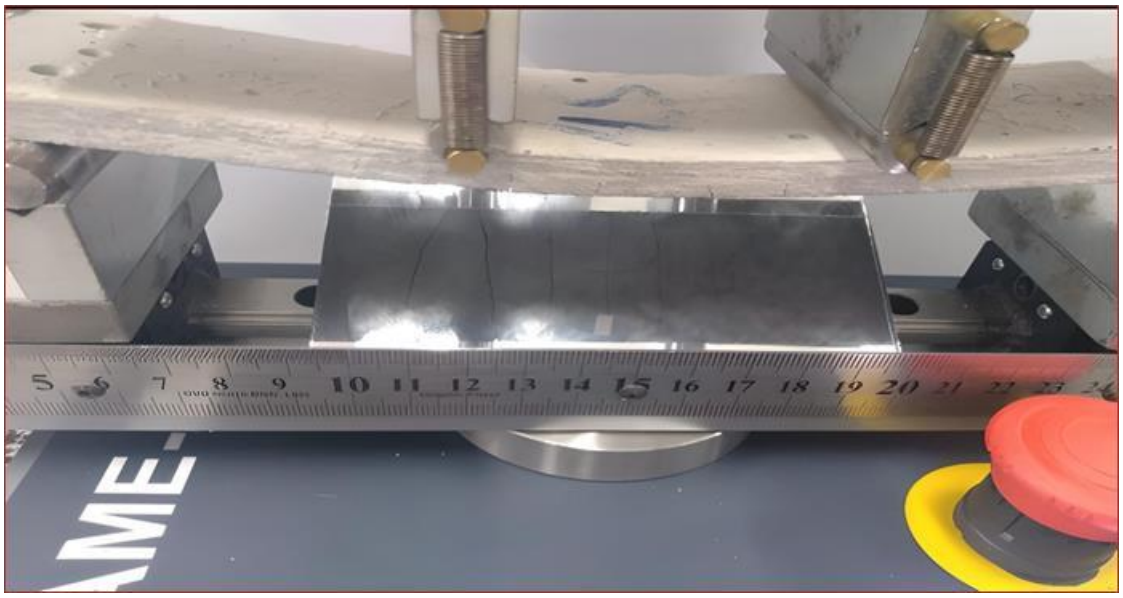
Compósitos	Regiões				
	I		IV		
	σ_1 (MPa)	d (mm)	σ_r (MPa)	d_u (mm)	T (KJ/m²)
M1K4M	7,58(± 3,58)	0,81	31,63(± 5,45)	6,16	6,68
M1K4S	6,86(± 0,64)	0,63	21,33(± 1,44)	12,92	10,08

Fonte: elaborado pelos autores

Nota-se que o compósito com teor de 4% de fibra de malva apresentou valores de resistência bem maiores com relação ao compósito com fibra de sisal de mesmo teor. Ao analisar a região I da curva, o compósito M1K4M apresentou uma tensão de primeira fissura de cerca de 10,35% maior que a do compósito M1K4S, do mesmo modo, na região IV o reforço com malva ainda obteve desempenho 48,3% superior ao de sisal em relação a tensão de ruptura, onde mesmo com a área de dispersão do gráfico houve poucas sobreposições entre eles. Isso se deve ao fato de que a fibra de malva possui menor diâmetro (espessura) que a fibra de sisal, o que permite maior superfície de contato entre a matriz e o reforço e, consequentemente, melhor transferência de tensões e menos falhas intercelulares nas microfibrilas da fibra natural.

No entanto, ao avaliar seu comportamento a partir das regiões II e III, o compósito M1K4S obteve maior quantidade de fissurações (figura 9) nessa etapa pré-ruptura, com uma diferença de 102,4% da deformação última (d_u) e acréscimo de tensão até a tensão de ruptura de 210,9%, enquanto que M1K4S apresentou 172% de ganho de resistência. Observa-se na Tabela 2 que a tenacidade de M1K4S é 50,9% superior à M1K4M, o que reflete nas observações sobre a fissuração feitas acerca da região III. Na região V, por conseguinte, ainda é possível analisar que M1K4S não colapsa de forma abrupta, tal qual o decaimento de sua curva de tensão x deformação permanece suave, o que caracteriza a maior atuação do reforço fibroso na curva pós-ruptura do compósito.

Figura 9 - Fissurações múltiplas visíveis na amostra M1K4S

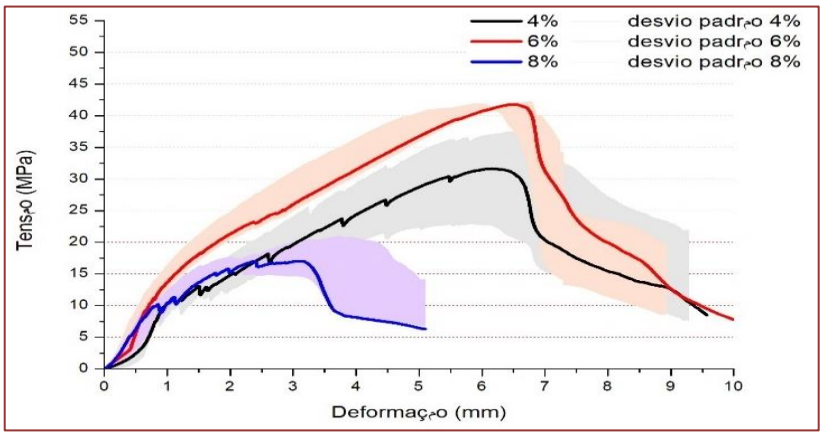


Fonte: elaborado pelos autores

4.2.2. INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NO DESEMPENHO MECÂNICO

A seguir, na figura 10 são apresentadas as curvas de tensão x deformação para os compósitos com diferentes teores de fibra de malva (4, 6 e 8%) e seus valores de tensão em módulo para as regiões da curva estudadas:

Figura 10 – Curvas de tensão x deformação dos compósitos M1K4M, M1K6M e M1K8M



Fonte: elaborado pelos autores

O gráfico mostra que as curvas de M1K4M e M1K6M apresentam um padrão de comportamento semelhante, assim como a dispersão dos mesmos. A partir da região II, o ganho de resistência de ambos segue uma linha de tendência semelhante, com o M1K6M apresentam maiores valores de resistência, os quais serão detalhados a seguir. Ainda se percebe que teores maiores que 6% acarretam em uma queda do desempenho mecânico do compósito.

Tabela 3 - Valores médio de tensão de primeira fissura e ruptura e tenacidade dos compósitos M1K4M, M1K6M e M1K8M

Compósitos	Regiões				
	I		IV		
	σ_1 (MPa)	d (mm)	σ_r (MPa)	d_u (mm)	T(KJ/m²)
M1K4M	7,58(± 3,58)	0,81	31,63(± 5,45)	6,16	6,68
M1K6M	11,21(± 2,78)	0,78	41,80(± 0,23)	6,54	10,35
M1K8M	9,83(± 1,14)	0,80	17,03(± 3,26)	3,13	2,54

Ao verificar a Tabela 3, é notório como o melhor desempenho mecânico é obtido com fração de volume de fibra de 6%, onde o compósito M1K6M possui tensão de primeira fissura cerca de 47,89% maior que M1K4M e tensão de ruptura com 32,1% maior que a do compósito com teor de 4%. O M1K6M ainda demonstrou suportar maiores energias de deformação, com tenacidade superior cerca de 55% em relação ao compósito M1K4M. Ao aumentar a quantidade de fibra, a distribuição da tensão se torna mais uniforme e garante maiores valores de resistência ao compósito.

O compósito M1K8M apresentou valores de resistência e deformação muito abaixo dos compósitos anteriores, podendo ter sido ocasionado por dificuldade em homogeneizar a distribuição das fibras no compósito ou má adesão entre a matriz e a fibra devido à matriz cimentícia não conseguir suportar a compressão na parte superior da amostra e, dessa forma, não haver uma transferência de tensões da matriz para a fibra de forma adequada. Estes resultados vão em contrapartida aos resultados obtidos por

Oliveira (2013), onde ele obteve maiores valores de resistência de tensão de ruptura e tenacidade, com uma diferença de 60,3% e 301,6%, respectivamente, acima dos resultados obtidos neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

Em virtude dos resultados apresentados nessa pesquisa, pode-se avaliar que os materiais empregados possuíam as características ideais e estavam em boas condições para aplicação da metodologia prevista para este trabalho. A metodologia aplicada propiciou bons resultados que foram condizentes com alguns encontrados na literatura, à exceção de determinadas amostras que foram destacadas no decorrer da discussão de resultados.

Na análise comparativa entre o desempenho das fibras de malva e de sisal como reforço de um compósito, pudera-se observar que, apesar da fibra de sisal já ter sido previamente investigada e avaliada como mais resistente à tração que a fibra de malva, a fibra da região amazônica proporciona melhores propriedades de resistência mecânica ao compósito, com ganhos de 48,3% na tensão de ruptura. Contudo, conforme abordado, o reforço com sisal propicia maior tenacidade ao material (50,9% de diferença em relação a malva), devido à sua rigidez, permitindo assim maior ductilidade e margem de segurança estrutural ao compósito, evitando o seu colapso e perda de resistência abruptas. Estes resultados foram bem parecidos com os de Melo Filho (2012), onde obteve acréscimo de tensão de cerca de 200% e de tenacidade em torno de 15 KJ/m² com teor volumétrico de 6% de fibra de sisal.

Na investigação por um teor ótimo de fibra de malva que pode ser inserida à matriz, constatou-se que um teor de 6% proporcionou melhores resultado de resistência última e tenacidade e, pela análise de sua curva tensão x deformação, também proporcionou maior quantidade de múltiplas fissurações (vide região II e II). Outrossim, o compósito M1K6M apresentou resultados superiores aos laminados cimentícios desenvolvidos por Oliveira (2013) com teor de 8%, o que reforça a ideia de que o teor de 6% de malva por volume é o ideal para um melhor desempenho mecânico do compósito.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM pela concessão da bolsa que permitiu a realização deste projeto, aos responsáveis técnicos dos Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LaMAC, Laboratório de Ensaios Mecânicos – LEM e Laboratório de Materiais – LabMat por todo o auxílio técnico nos ensaios realizados e ao Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho por todo o suporte e conhecimento transmitido.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT. NBR 5732 - Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro. 1991.

[2] ABNT. NBR 12653 - Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro. 2014.

[3] ABNT. NBR 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

[4] ABNT. NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

[5] ANDRADE SILVA, F. D.; CHAWLA, N.; FILHO, R. D. D. T. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. Composites Science and Technology, Rio de Janeiro, v. 68, n. 15 - 16, p. 3438 - 3443, Outubro 2008.

[6] ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; FILHO, R. D. T. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. Construction and Building Materials, Barcelona, Espanha; Castelldefels, Espanha; Rio de Janeiro, Brasil, v. 79, p. 115 - 128, Janeiro 2015.

[7] ASHIK, K. P. SHARMA, R. S. A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 3, 420-426, 2015.

[8] CAVALCANTE, D. G. Estudos das características fisica, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratados e adição de material pozolânico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus , p. 122. 2017.

[9] FILHO, J. A. M. Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibra de sisal. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 200. 2012.

[10] FILHO, R. D. T. et al. Durabilidade dos laminados de argamassa reforçada com fibra de sisal moldada por compressão, Rio de Janeiro, v. 23, n. 6, p. 2409 - 2420, Junho 2009.

[11] HOMMA, A. K. O. In: WITKOSKI, A. C. A cultura de juta e malva na amazônia ocidental: sementes de uma nova racionalidade ambiental? São Paulo: AnnaBlume, 2010.

[12] OLIVEIRA, I. R. C. Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013. Manaus, p. 96. 2013.

[13] PEREIRA, M. C. M. Desenvolvimento de painéis sanduíche com núcleo de concreto leve com caroços de açaí e laminados cimentícios reforçados com fibras de juta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 99. 2019.

[14] ROMÃO, C. M. N. Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto. Porto, p. 146. 2003.

[15] SOUZA, H. H. Ambiente e sociedade: a cadeia produtiva da malva (Urena lobata L.) no médio Solimões: uma alternativa sustentável? Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) –– Universidade Federal do Amazonas. Manaus, p. 109. 2010.

[16] TAN, Z.; BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. Materials and Structures, Sheffield, UK, v. 50, n. 235, outubro 2017. ISSN 1359-5997.

[17] VEIGA, N. A. Comportamento à fratura em modo I de compósitos de matriz polimérica, reforçados com fibras de juta. DIssertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Porto. Porto, p. 112. 2014.

[18] VELASCO, R. V. Concretos Autoadensáveis Reforçados com Elevadas Frações Volumétricas de Fibras de Aço: Propriedades Reológicas, Físicas, Mecânicas e Térmicas. Tese de Doutorado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 200. 2008.

Capítulo 9

Análise da viabilidade da utilização de concretos com adição de Pó de Vidro Reciclado na construção civil

Maury Vieira de Oliveira
Mônica Calixto Andrade

Resumo: A presente pesquisa consiste em analisar três amostras de concreto, sendo que, cada uma com três percentuais distintos de substituição da parcela de cimento por Pó de Vidro Reciclado (PVR), material com predominância da mineral sílica.

Utilizamos um concreto de classe de resistência característica de 30 MPa, o qual denominamos de C-30, que irá receber uma substituição nos percentuais de cimento por PVR de 0%, 20% e 40% respectivamente.

O PVR, que se utilizou neste trabalho, é um material reutilizado, de origem de vidros moídos provenientes de ampolas para medicamentos. Sua predominância em Sílica justifica o interesse pela pesquisa, de modo a avaliar as propriedades do concreto produzido, avaliando seu comportamento em relação a manifestações patológicas e a viabilidade de utilização nas diversas áreas da engenharia.

Para elaboração do estudo proposto, a metodologia empreendida abordou a confecção de corpos de prova para as três amostras distintas e a realização de ensaios de absorção de água, resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação, microscopia eletrônica de varredura e análise termogravimétrica.

Todas as amostras são submetidas ao mesmo ambiente de agressividade, constituído de uma solução de NaCl na concentração de 165g/l, estando sob as mesmas condições de umidade, temperatura e pressão. O objetivo de submeter as amostras a esta solução é de acelerar à exposição a ambientes agressivos.

Com base nos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados, pretende-se avaliar a viabilidade do uso do (PVR) na confecção de concretos em nível industrial, de forma a minimizar o uso de cimento e dar destinação adequada a este tipo de resíduo.

Palavras-Chave: Manifestações patológicas, utilização de resíduos industriais na construção civil.

1. INTRODUÇÃO

Nas edificações, em geral, sejam elas, residenciais, comerciais ou industriais, ou obras especiais de concreto, tais como pontes, viadutos, passarelas e outras, todas estão sujeitas a ações de cargas permanentes[1], cargas variáveis e acidentais[2] que irão dar as diretrizes ao dimensionamento, ao cálculo estrutural adequado, à escolha de concepções estruturais e aos materiais a serem utilizados.

Além dessas cargas previstas, que são cargas relacionadas aos esforços e comportamento mecânico, deve-se levar em consideração a durabilidade da estrutura. A durabilidade de uma estrutura está relacionada ao ambiente ao qual ela estará exposta e, consequentemente, à classe de agressividade ambiental a que irá se enquadrar.

De acordo com a ABNT NBR-6118/14 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTOS, o grau de agressividade ao qual a estrutura estará exposta deverá ser classificado em fraco, moderado, forte ou muito forte, conforme tabela 1.

Tabela 1: Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana (a,b)	Pequeno
III	Forte	Marinha (a)	Grande
		Industrial (a,b)	
IV	Muito forte	Industrial (a,c)	Elevado
		Respingo de maré	

Fonte: ABNT NBR-6118/14

Em ambientes de proximidade com o mar, zonas de respingo de maré e áreas industriais, a estrutura estará sujeita à ação de agentes externos que podem ser físicos, químicos ou biológicos, atuando de modo deletério sobre o concreto. Agentes químicos, tais como cloretos e dióxido de carbono são desencadeadores comuns no processo de surgimento de patologias que levam à deterioração de estruturas em concreto.

Dentre as manifestações patológicas patologicas estruturais mais comuns, nessas condições, destacam-se a carbonatação, lixiviação, eflorescência e reação álcalis agregado.

Esta pesquisa tem como objetivo estudar opções de utilização do PVR na confecção de concreto, avaliando suas propriedades relacionadas à resistência mecânica e durabilidade.

A incorporação do PVR ao concreto, como substituição do percentual de cimento, gera uma diminuição no seu consumo e propicia uma destinação adequada ao PVR que muitas vezes é descartado de forma inapropriada, sendo esse material um resíduo industrial totalmente passível de reciclagem.

Essa preocupação, tanto com a destinação adequada do PVR, quanto com a diminuição do consumo de cimento, justifica nosso objetivo e se alinha à tendência mundial atual de conservação dos recursos naturais e diminuição de consumo de energia, com a finalidade de reduzir os níveis de poluição. Intenção, essa que impulsiona cada vez mais as pesquisas e favorece o diálogo científico entre as distintas áreas do conhecimento.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, as vendas de cimento no Brasil, em dezembro de 2020, somaram 4,7 milhões de toneladas, o que corresponde a um crescimento de 16,6% em relação ao mesmo mês de 2019, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento - SNIC. Com

[1] Cargas que atuam de forma continua sobre a estrutura, tais como peso próprio, e cargas de utilização.
[2]- Cargas variáveis são constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da água, devendo-se respeitar as prescrições feitas por Normas Brasileiras específicas.

base neste apontamento, o setor terminou 2020 com um total de 60,8 milhões de toneladas de cimento vendidas, o que corresponde a um aumento de 10,9% sobre o ano anterior.

A possibilidade de viabilizar a adição de um resíduo industrial, como o PVR, proposto neste estudo, em uma proporção média de 20% implicaria em uma redução da ordem de 12 milhões de toneladas de cimento em nível nacional.

Estudos realizados com adições de Cinzas de Casca de Arroz – CCA (LIMA et. al, 2021) e micro sílica (FORNASIER, 1995) apontaram para uma possibilidade ampla de utilização do PVR.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para o desenvolvimento deste estudo e preparo dos corpos de prova, utilizou-se um cimento CPIII – 40 – RS – ECOFORTE da marca Campeão, que é definido como um cimento Portland de alto forno, de acordo com as prescrições normativas da NBR-16697/2018. Este cimento confere uma resistência final de 40 MPa aos 28 dias e apresenta resistência a sulfatos (RS). Este é um produto largamente utilizado em obras de fundações e estruturas, indicado para obras expostas a ambientes agressivos. O mesmo foi adquirido em material de construção local.

Utilizou-se areia do tipo média lavada, definida com granulometria entre 0,25 mm e 1,00 mm, adquirida em material de construção local.

Como agregado graúdo utilizou-se brita tipo 1, definida por ter granulometria de diâmetros entre 9,5 mm e 19,0 mm, adquirida em material de construção local.

O Pó de Vidro Reciclado (PVR), proveniente de ampolas de medicamentos, este material foi fornecido pelo laboratório da UERJ – Nova Friburgo – RJ. Segundo (HANNING et. al, 2019), que utilizou este mesmo PVR, as características físico-químicas observadas neste material são mostradas na tabela 2.

Tabela 2: Composição do PVR

SiO_2	80,53%
Al_2O_3	3,64%
Fe_2O_3	0,08%
Na_2O	7,96%
K_2O	0,05%
BaO	1,37%
MgO	0,05%
CaO	0,49%
TiO_2	0,09%
PbO	0,02%
B_2O_3	5,38%

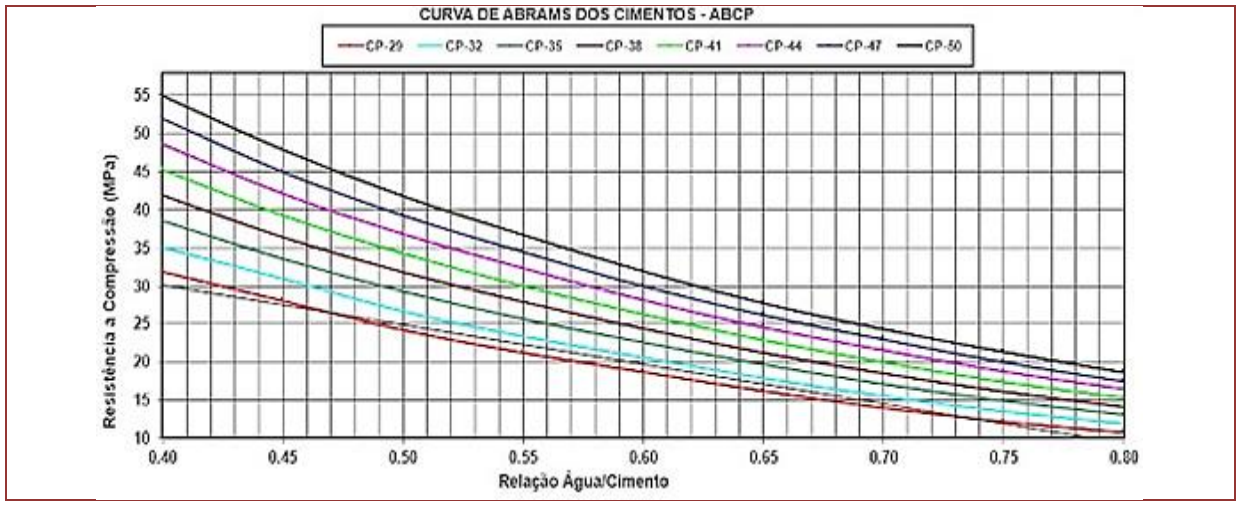
A água utilizada para o emassamento do concreto foi da rede pública local, de forma a buscar se aproximar mais da realidade de obras populares onde não se tem um controle de qualidade da água a ser utilizada no traço do concreto.

2.2. DOSAGEM DO CONCRETO

Para dosagem do concreto utilizado nas três amostras seguiu-se as prescrições da Associação Brasileira de Cimentos Portland – ABCP.

Adotou-se uma resistência característica de 30 Mpa como ponto de partida para determinação do traço, seguindo a curva de ABRAMS, de acordo com a figura - 02.

Figura - 02 – Curva de ABRAMS para determinação de traços de concreto.



Fonte: ABCB (Associação Brasileira de Cimentos Portland).

A relação água cimento, assim como a formulação para determinação do consume de cimento, areia e brita, foram extraidos do manual a ABCP. Para tanto, deverá ser utilizado o fcd do concreto, ou seja, a resistência de projeto aos 28 dias do concreto que é determinada pela eq. (1). O sd adotado foi igual a 4, em virtude do controlde de qualidade previsto.

$$fcd = fck + (1{,}65xsd) \quad (1)$$

Adotou-se um abatimento típico entre 80 e 100 mm e tendo sido utilizado brita nº. 1 como agregado graúdo, chegou-se a um consume de água de 205 l/m^3, conformepode ser observado na tabela 03.

Tabela – 03 – Tabela da ABCP para determinação do consumo de água em função do abatimento do concreto e dimensão do agregado gaúdo

Consumo de Água (l/m^3)					
Abatimento (mm)	D Máx. agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: ABCB (Associação Brasileira de Cimentos Portland).

O consumo de cimento é obtido pela relação entre o consume de água determinado na tabela 02 e a relação água cimento extraida da curva de ABRAMS, conforme eq. (2).

$$Cc = \frac{Ca}{AC} \quad (2)$$

Para a determinação do consume de agregado graúdo adotou-se o módulo de finura do agregado miúdo (MF) igual a 2,60, tendo em vista estarmos utilizando areia média como agregado miúdo no traço. Este valor deverá ser relacionado com a dimensão máxima (mm) do agregado graúdo, neste caso 19,0 mm, por se tratar de brita n.1, que resultará em 0,69 m^3, conforme tabela 4.

Tabela 4 – Tabela da ABCP para determinação do consumo de agregado gaudo em função do módulo de finura e dimensão máxima do agregado

MF	Dimensão MÁX. (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: ABCB (Associação Brasileira de Cimentos Portland).

Dessa forma o consume de agregado graúdo se define por meio da eq. (3).

$$C_b = V_b \, x \, UM \tag{3}$$

Onde:

M_U é a massa unitária compacta do agregado de 1500 Kg.

V_b é o volume do agregado seco.

O consumo de agregado miúdo, por sua vez, é encontrado através da eq. (4).

$$C_a = V_a \, x \, \gamma_a \tag{4}$$

Onde Va é o volume do agregado seco em metros cúbicos (m^3) e γa é a massa específica do agregado miúdo (adotado 2.700 Kg/m^3).

Portanto, o traço para o concreto de 30 MPa adotado é determinado pela eq. (5).

$$1 : \frac{Ca}{Cc} : \frac{Cb}{Cc} : A/C \tag{5}$$

Portanto temos o seguinte traço;

1 : 1,75 : 2,47 : 0,49

Com o traço determinado, deu-se a preparação do concreto e enchimento das formas para a moldagem dos corpos de prova. Estes ficaram durante 28 dias submersos em água de forma que ocorresse o processo de cura do concreto.

Decorrido o processo de cura, os corpos de prova foram submersos em uma solução de cloreto com concentração de 165g de NaCl por litro de água por um período de 90 dias, conforme prescrito no NordTest NTBuild 443. Esse teste consiste em induzir a difusão do cloreto por entre os poros do concreto.

2.3. ANÁLISE DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

Após removidos da solução de NaCl, os corpos de prova tiveram suas massas medidas por 72 horas, período este em que a perda de massa se mostrou não mais variar. Dessa forma pode-se avaliar a perda de massa ao longo do tempo e consequentemente relacioná-la com a absorção de água destas amostras, possíveis vazios formados e porosidade das amostras.

2.4. ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Após as amostras terem sido secas e feita a análise de absorção de água, estas foram submetidas ao ensaio de compressão axial. Dos seis corpos de prova de cada uma das amostras, quatro foram destinados à este ensaio, buscando ter uma estatística satisfatória dos resultados obtidos. A intenção de se realizar esta análise, se baseia em observar, se a adição de PVR compromete ou favorece de alguma forma a resistência prevista do concreto durante a fase de projeto.

Realizou-se o ensaio na empresa Santos Jardim Engenharia e Serviços Ltda – ENGEART em Macaé RJ. Utilizou-se uma prensa Contenco, da fabricante Pavitest, conforme mostrado na figura – 04.

Figura – 04 – Prensa hidráulica para ensaio de compressão axial

Fonte: Próprio autor

2.5. ENSAIO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Para a medida da profundidade de carbonatação, ou seja, a distância da superfície do concreto até seu interior comprometida pela carbonatação, utilizou-se um indicador a base de fenolftaleína. Segundo (NEVES, 2005) A fenolftaleína é um indicador, cuja faixa de viragem é 8,3 a 10,0, ou seja, para valores de pH superiores a essa faixa o concreto não carbonatado permanece vermelho carmim, enquanto o concreto carbonatado apresenta-se sem alteração de cor. A preparação da solução de fenolftaleína foi feita na proporção de 1,0g de fenolftaleína p.a. ($C_{20}H_{14}O_4$) diluída em 100 mg de álcool etílico (C_2H_5OH).

Um corpo de prova de cada amostra foi cortado longitudinalmente e sobre sua superfície interna borrifou-se a solução indicadora.

A mudança de cor na face submetida ao ensaio permite que se faça uma nítida avaliação e medição por meio de um paquímetro ou mesmo uma simples régua a profundidade de carbonatação.

2.6. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Com o intuito de analisar as características morfológicas do material estudado, principalmente em relação a porosidade, aderência entre as partículas, formação de fissuras e possíveis planos de ruptura, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Laboratório de Polímeros do IPRJ da UERJ polo de Nova Friburgo. O MEV utilizado foi um Modelo TM3000 – Tabletop Microscope da fabricante HITACHI, figura 05.

Figuras – 05 – MEV utilizado

Fonte: Próprio autor

Foram retiradas dos corpos de prova amostras cortadas em formato cúbico, as quais foram identificadas e separadas de forma a distingui-las a qual amostra original pertenciam.

Após preparadas, iniciou-se o processo de leitura no MEV onde definiu-se em fazer para cada amostra três imagens com ampliações diferenciadas, a primeira com um aumento de (100x), a segunda (500x) e a terceira (1000x).

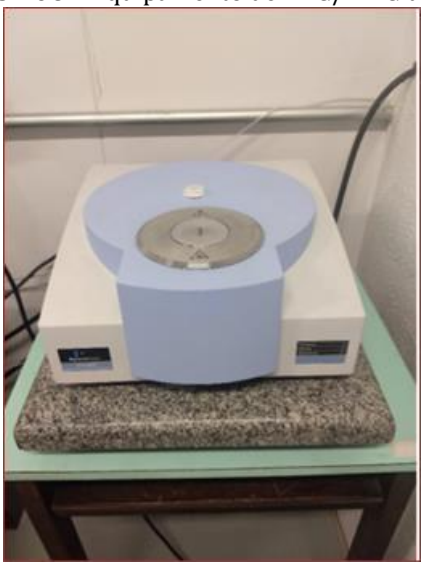
2.7. ENSAIO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (ATG) E DERIVADA DA TERMOGRAVIMÉTRICA (DTG)

De acordo com Soares (2017), a análise termogravimétrica (ATG) e a derivada da análise térmica (DTG), são técnicas de caracterização essenciais para avaliar a atividade pozolânica, visto que, possibilitam estimar a quantidade de Hidróxido de Cálcio - $Ca(OH)_2$ em materiais a base de cimento.

A ATG se baseia na medição de perda de massa em função de um incremento de temperatura a uma determinada taxa de aquecimento.

Utilizou-se o equipamento Modelo STA 6000 – da fabricante Perkin Elmer, figura 6, disponibilizado pelo Laboratório de Biomateriais do IPRJ da UERJ polo de Nova Friburgo.

Figuras – 06 – Equipamento de ATG/ DTG utilizado



Fonte: Próprio autor

As amostras foram preparadas por processo de moagem em um Graal e pilão até que as partículas se apresentassem bem homogêneas. Foram separadas cerca de 15 mg de material de cada uma das amostras. As amostras foram aquecidas até uma temperatura de aproximadamente 1000ºC, onde se estabilizou a curva referente à perda de massa. Foi atribuído ao processo uma taxa de aquecimento de 10ºC/min. Foram utilizadas 6,0 mg de material os quais foram previamente preparadas e colocadas em cadinhos de alumina.

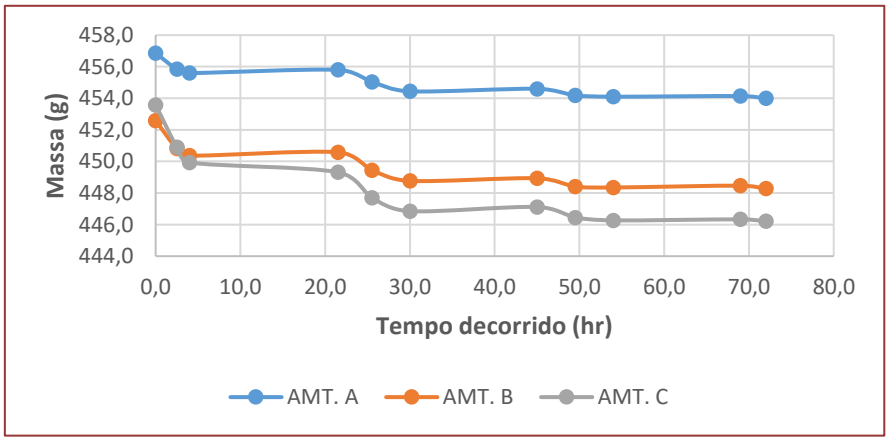
Após o equipamento ter gerado os resultados pertinentes às análises de cada uma das amostras, estes foram exportados para o software SciDAVis, onde foram plotadas as curvas referentes ATG e a DTG.

3. RESULTADOS

3.1. RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A análise da medição das massas, ao longo do tempo de secagem dos corpos de prova, mostrou que as amostras que receberam adição de PVR (Amostra B - 20% e Amostra C - 40%) tiveram maior absorção de água de forma proporcional ao percentual de PVR adicionado em relação à amostra natural (Amostra A), a qual não recebeu a adição de PVR. Esses dados podem ser observados no gráfico da figura 7 e a partir dos dados da tabela 5.

Figura – 07 – Gráfico da perda de massa em relação ao tempo



Fonte: Próprio autor

Tabela – 05 – Controle da perda de massa em relação ao tempo.

	CP	CONTROLE DA PERDA DE MASSA (g) AO LONGO DO TEMPO											Teor de Umidade (%)	Média do Teor de Umidade (%)
	Data	23/08/2021			24/08/2021			25/08/2021			26/08/2021			
	Hor.	11:00	13:30	15:00	08:30	12:30	17:00	08:00	12:30	17:00	08:00	11:00		
AMOSTRA - A	1	461,3	460,1	460	460,2	460	459,1	459,4	458,8	458,6	458,7	458,5	0,59	0,6
	2	456,4	445,5	445,2	445	444,3	443,8	444	443,6	443,4	443,5	443,3	2,85	
	3	459,6	458,8	458,4	458,6	457,9	457,4	457,5	457,1	457	457	456,9	0,57	
	4	452	450,7	450,4	450,9	449,6	449,3	449,4	448,8	448,9	448,9	448,7	0,69	
	5	454,5	453,4	453,1	453,2	452,5	451,8	451,9	451,6	451,4	451,5	451,4	0,68	
	6	456,9	456,2	456,1	456,1	455,2	454,6	454,8	454,6	454,6	454,6	454,5	0,50	
AMOSTRA - B	1	457,9	456,7	456,3	456,2	455,4	454,6	454,7	454,3	454,1	454,3	454,1	0,83	0,94
	2	455,3	453,5	453,1	453,5	452,3	451,7	451,9	451,4	451,3	451,4	451,2	0,88	
	3	443	441,3	440,9	441,2	440	439,4	439,5	439	438,9	439,1	438,8	0,93	
	4	457	455,1	454,6	454,9	453,9	453,2	453,3	452,8	452,8	452,9	452,8	0,92	
	5	445,8	444,2	443,7	443,9	442,7	441,8	441,9	441,3	441,5	441,5	441,4	0,96	
	6	456,5	454,1	453,6	453,8	452,4	451,9	452,3	451,6	451,5	451,6	451,4	1,10	
AMOSTRA - C	1	447,7	445	443,9	443,3	441,8	440,7	441,2	440,3	440,1	440,2	440	1,70	1,61
	2	456,7	453,6	452,6	452,1	450,5	449,4	449,7	449,1	449	449	448,9	1,69	
	3	457,9	455,3	454,7	453,7	452,3	451,6	451,7	451,2	450,8	450,9	450,8	1,55	
	4	450,4	447,8	447	446,4	445	444,2	444,4	443,8	443,8	443,8	443,7	1,47	
	5	447,8	445,3	444	444,1	442,1	441,7	441,8	441,2	441	441,1	441	1,52	
	6	461	458,4	457,4	456,3	454,5	453,5	453,9	453,1	452,9	453	452,9	1,76	

Fonte: Próprio autor

3.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Os corpos de prova rompidos foram medidos e ensaiados conforme prescrição normativa da NBR-5739/07 – "Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos" e os resultados obtidos foram planilhados conforme tabela – 06.

Devido às dimensões dos corpos de prova não serem conforme o padrão normativo, ou seja a relação h/d (altura/ diâmetro) ser menor que 1,94, multiplicou-se a força de ruptura pelo fator de correção correspondente conforme tabela 2 do ítem 6,1,2 da Norma, conforme tabela 6.

Tabela – 06 – Fator de correção da força de ruptura de corpos de prova cilíndricos em função da relação altura sobre diâmetro.

Relação h/d	2.00	1,75	1,5	1,25	1.00
Fator de correção	1.00	0,98	0,96	0,93	0,87

Fonte: ABNT-NBR-5739/2007.

Tabela – 07 – Resultados de ensaio de compressão axial

	CP	ALTURA - H (mm)	DIÂMETRO 1 - D1 (mm)	DIÂMETRO 2 - D2 (mm)	ÁREA FACE SUPERIOR (cm^2)	FORÇA NA RUPTURA (N)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO (MPa)	AMPLITUDE (MPa)	DESVIO PADRÃO	VARIÂNCIA
AMT - A	1	78,0	53,0	53,0	22,1	57.800	25,2	28,23	3,07	3,10	0,11
	2	76,0	53,0	53,0	22,1	42.600	18,5		9,69		
	3	78,0	53,0	53,0	22,1	79.500	34,6		6,38		
	4	76,0	53,0	53,0	22,1	79.500	34,6		6,38		
AMT - B	1	77,0	53,0	53,5	22,3	55.190	23,6	24,04	0,46	1,04	0,04
	2	77,0	53,0	53,0	22,1	56.200	24,5		0,43		
	3	75,0	52,5	53,0	21,8	46.400	20,2		3,84		
	4	77,0	53,0	53,0	22,1	64.100	27,9		3,87		
AMT - C	1	77,0	53,0	53,0	22,1	27.400	11,9	14,75	2,82	0,68	0,05
	2	79,0	52,5	53,0	21,8	34.400	15,0		0,23		
	3	79,0	53,0	53,0	22,1	37.300	16,2		1,49		
	4	77,0	53,0	53,0	22,1	36.400	15,8		1,10		

Fonte: Próprio autor

3.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

O indicador a base de fenolfetaleina utilizado para a amostragem da zona afetada ou não pela carbonatação confere uma cor magenta à parte que permaneceu inalterada, mantendo a alcalinidade caracteristica do concreto, com pH em torno de 12,5.

Já a parte onde o concreto mantem sua coloração inalterada, é indicative de que alí houve carbonatação e consquentemente redução do pH para faixas entre 8,0 e 9,0.

Os resultados são observados nas imagen geradas, conforme figura 8.

Figura – 08 – Resultados do ensaio de profundidade de carbonatação com indicador a base de fenolfetaleina

(A) (B) (C)

Fonte: Próprio autor.

As medidas encontradas com o auxílio de um paquimetro, estão mostradas conforme tabela 8.

Tabela – 08 – Resultados de ensaio de compressão axial

Amostras	Profundidade de Carbonatação (mm)		Figura
	Superfície Superior do CP	Superfície Lateral do CP	
AMOSTRA A	0,00	1,00	(A)
AMOSTRA B	1,60	2,00	(B)
AMOSTRA C	1,80	3,00	(C)

Fonte: Próprio autor

Observou-se que as amostras com adição de PVR, amostras B e C, são mais afetadas pela carbonatação.

3.4. RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

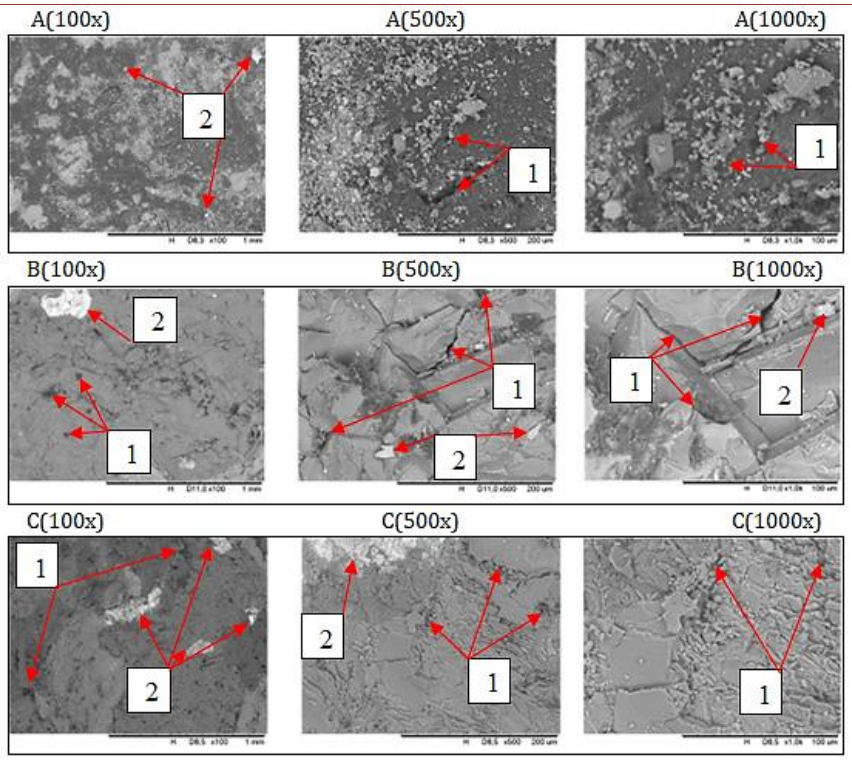
Através das imagens geradas pelo MEV, é possível observar maior formações de fratura e porosidade nas amostras B e C, as quais receberam adição de PVR.

Ajustando o foco para (100x), com o objetivo de identificar os pontos de maior interesse para diagnóstico, ou seja, pontos com algum detalhe específico na imagem que pudessem ser relevante para direcionamento do estudo, gerou-se imagens para as três amostras A, B e C.

Posteriormente, recorreu-se a imagens com foco ampliado de forma a caracterisar a porosidade, formação de cistais, tendencias de fissuração e análise de aderência entre as particulas constituintes do concreto.

As imagens mais ampliadas, (500x) e (100x) das amostras B e C se mostraram com maiores formações de poros e tendências a fraturas conforme figura 9.

Figura – 09 – Imagens geradas pelo MEV



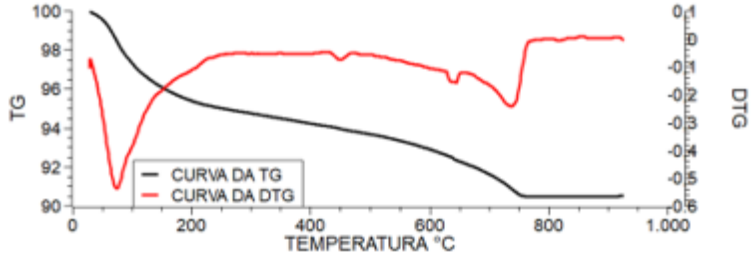
Fonte: Próprio autor.

3.5. RESULTADOS DA ATG E DERIVADA DA TG

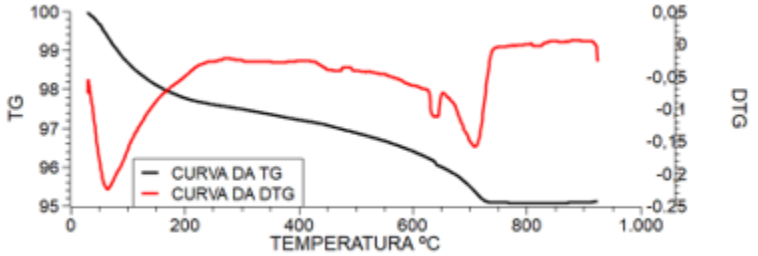
Os gráficos gerados com base nos dados extraídos do ensaio de ATG geraram estão representados ara cada uma das amostras, A, B e C.

A curva em vermelho representa a ATG e a curva em preto a DTG.

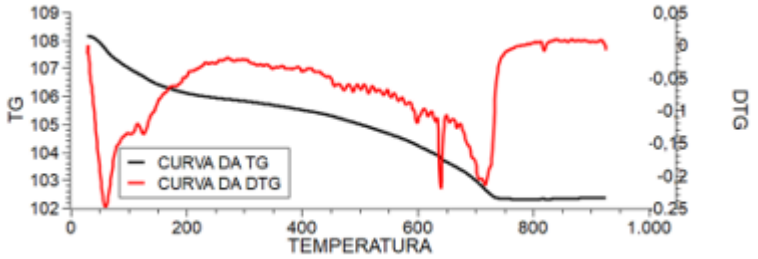
(Amostra A)



(Amostra B)



(Amostra C)



4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1. ANÁLISE DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Conforme descrito no capítulo anterior, a análise do teor de umidade e absorção de água das amostras foi realizada através da pesagem das amostras saturadas e sucessivas pesagens ao longo de setenta e duas horas (72hr). Dessa forma pode-se observar que todas as amostras tiveram um comportamento de perda de massa semelhante umas das outras. Essa perda de massa se dá em função da evaporação da água que preenche os vazios e os interstícios do concreto. Outra forma que a água faz parte do concreto é em forma de ligação. Esta não evapora por meio desta metodologia, apenas em temperaturas mais elevadas, tais como em um ensaio de ATG.

A diferença no teor de umidade entre as amostras A, B e C, com base nos resultados obtidos, sugere concluir que as quanto maior as adições de PVR, maior a absorção de água do concreto. Esta relação direta entre o aumento do percentual introduzido de PVR e o teor de umidade da amostra pode ser explicado em função do aumento de partículas finas, que tendem a aumentar a área superficial entre as partículas constituintes do concreto e consequentemente levar a uma maior capacidade de absorção de água.

Podemos ainda concluir que como o PVR fora introduzido nas amostras de forma substitucional à percentagem de cimento, que possivelmente as reações químicas de hidratação não tenham ocorrido, edvido a diminuição de material pozolânico.

Segundo Senff (2005), o cimento Portiland é o principal aglomerante hidráulico utilizado na construção civil. Quando misturado em água dá origem a reações químicas denominadas de hidratação. Portanto é de se considerar que com a retirada de parte do cimento e acréscimo de partículas de PVR, possa ter reduzido a capacidade de aglomeração entre as partículas constituintes das amostras. Este fato pode acarretar em maior área superficial, conforme já descrito e consequentemente, maior índice de vazios e porosidade.

Podemos entender também que com esta falha na hidratação haja uma influência direta na resistência característica do concreto. Logo, as amostras que obtiveram maior substituição de PVR pelo cimento tendem a terem perdido resistência.

4.2. ANÁLISE DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão axial submete ao corpo de prova de cada amostra uma carga transmitida por um pistão de uma prensa hidráulica, que aqui denominaremos de força F. O corpo de prova tem suas dimensões aferidas e anotadas, tanto altura como diâmetro e devem seguir as prescrições normativas da ABNT NBR 5739/07 – "Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos". De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 6 do item 3.2, as amostras foram perdendo resistência de acordo que receberam adição do PVR.

Assim como analisado no item 4.1 deste capítulo, o aumento da absorção de água, indicando uma maior área superficial, um maior índice de vazios e porosidade, consequentemente induziria a uma perda de resistência do concreto. A amostra A apresentou em seu corpo de prova identificado como de número 2, um valor atípico dos demais e bem abaixo do esperado. Visto que o mesmo não ocorreu em nenhuma das outras amostras e corpos de prova, deduz-se que tenha sido algum tipo de falha no processo de homogeneização ou adensamento deste CP. Entretanto, refazendo-se a média dos valores de resistência obtidos entre as amostras de número 1, 3 e 4, observa-se que a resistência média atinge 30,27 Mpa, cerca de 0,9% acima do valor de projeto . A amostra B, que recebeu 20% de adição de PVR, a resistência média ficou na ordem de 24,04 Mpa, cerca de 19,87% abaixo do valor de projeto.

A amostra C, que recebeu 40% de adição de PVR, a resistência média ficou na ordem de 14,75 Mpa, cerca de 50,83% abaixo do valor de projeto.

Portanto, conforme resultados demonstrados da amostra C, pode-se descartar as possibilidades de utilização de substituições de cimento por PVR na ordem de 40%, baseado que há uma perda muito representativa nas propriedades relacionadas à absorção de água, porosidade resistência a compressão axial do concreto. A amostra B, que recebera 20% de substituição de cimento por PVR, ainda deve ser analisada com foco em utilização para outros fins que não sejam concreto estrutural. Uma perda de resistência da ordem de 19,87% não deve ser desprezada em nenhum tipo de aplicação de projeto.

4.3. ANÁLISE DO ENSAIO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Com base nos ensaios analisados até aqui, intuitivamente prevê-se que ocorrerá mais carbonatação nas amostras que receberam adição de PVR.

Este método mede a espessura afetada pela carbonatação a partir da superfície do CP de concreto.

O ensaio de profundidade de carbonatação realizado com fenolftaleína como indicador foi realizado para todas as amostras A, B e C, mesmo sabendo que a amostra C não atende aos requisitos, é interessante ter todos os resultados analisados de forma a buscar uma coerência entre os fatos. Mesmo com resultados já mostrando a não possibilidade de utilização de 40% de PVR em substituição ao cimento, é sugestivo que se realize todos os demais ensaios com todas as amostras afim de analisar o conjunto de reações e interferências ocasionadas por cada um dos percentuais amostrados e analisados.

As amostras B e C, conforme pode-se observar na figura 8 do item 3.3, mostram que a carbonatação atinge maiores profundidades para maiores adições de PVR.

Segundo Helene (1993), as superfícies expostas das estruturas de concreto a alta alcalinidade da solução intersticial obtida principalmente à custa da presença do hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$, liberado das reações de hidratação do cimento Portland, pode ser reduzida com o tempo. Essa redução ocorre essencialmente pela ação do gás carbônico, CO_2. presente na atmosfera. Outros gases ácidos como o dióxido de enxofre, SO_2 e o gás sulfídrico H_2S. também podem contribuir para a redução do pH da solução presente nos poros do concreto. Este processo pode ser representado pela seguinte reação.

$$Ca(HO)_2 + CO_2 > CaCO_3 + H_2O$$

O pH de precipitação do carbonato de cálcio $CaCO_3$ pode chegar a 8,3 o que leva a uma redução da estabilidade química da camada passivadora do aço.

Com base no relatado, pode-se deduzir que a adição de PVR nas proporções de 20% e 40%, não beneficiaram o concreto a nível de resistir à agentes agressivos nem tão pouco contribuiu para um aumento de resistência mecânica.

4.4. ANÁLISE DAS IMAGENS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

As amostras B e C mostraram-se com maiores tendências a fiçuras, o que justificaria terem absorvido mais água, perdido resistência mecânica e permitido maiores profundidades de carbonatação.

Segundo Silva, (2005), as imagens geradas por elétrons retro espalhados produzem tonalidades de cores que vão do branco ao preto passando por vários tons de cinza. Os pontos mais escuros, tendendo ao preto, representam os poros. Os tons de cinza mais escuro são referentes à parcela de cimento hidratada e, os tons de cinza mais caros à parcela de cimento não hidratada.

Na microscopia da figura 9 do ítem 3.4, estão destacados os pontos de formação de poros, fissuras e vazios pelo número (1), áreas de cimento não hidratadas pelo número (2) e as áreas de cimento hidratado com formação de hidróxido de cálcio C-S-H pelo número (3).

Com base na observação destas imagens pode-se concluir que a porosidade é menor na amostra A, a qual o traço do concreto não recebeu substituição de cimento por PVR. Grande parte da amostra A tem predominância do tom cinza escuro, o que evidencia que ocorreu uma hidratação adequada. Alguns pontos isolados de tonalidade cinza claro representando a deficiência na hidratação do cimento mas, em pouca quantidade.

A amostra B, a qual recebera 20% de substituição de cimento por PVR, apresenta uma formação de partes tendendo a fissuração e um número maior de pontos em tonalidade preta, demonstrando uma maior formação de poros e vazios. Essa amostra também apresenta pontos de má formação do processo de hidratação do cimento que também podem ser justificados em função de uma falha na homogeneização da pasta.

A amostra C, a qual rebera uma parcela de substituição de cimento por PVR da ordem de 40%, apresenta uma formação bem mais significativa de fissuras e vazios, muitas delas até mesmo se interligando umas as outras. Essa apresenta também áreas bem mais representativas de cimento não hidratado.

O aumento da porosidade e de vazios nas amostras que receberam substituição de cimento por PVR, amostras B e C, conferem resultados já analisados em ensaios de caracterização anteriores a este, justificando maiores absorções de água, diminuição da resistência e consequentemente um concreto com maior facilidade de carbonatar.

A falta de cimento, material pozolânico responsável pela aglomeração das partículas, nas amostras B e C, contribuíram para a deficiência aderência entre os abregados, formação de poros e vazios, reduzindo assim as propriedades físicas e mecânicas desses traços.

4.5. ANÁLISE DA ATG E DERIVADA DA TG

Nas três amostras, A, B e C ocorre uma perda de massa em torno de 100ºC. Essa diminuição de massa a essa temperatura é decorrente da água sendo eliminada. A amostra C, que recebera 40% de substituição de cimento por PVR, apresenta um valor de perda de massa nessa faixa de temperatura bem maior do que as amostras A e B, o que se explica pelo fato de, por ser mais poroso e conter mais vazios, absorve mais água, conforme atestado no ensaio de absorção de água.

Os picos observados na DTG entre 350º e 550ºC são decorrentes do processo de desidroxilação, onde ocorre a decomposição dos hidróxidos de cálcio $Ca(OH_2)$ formados na hidratação do cimento. Já os picos observados na DTG entre 600º e 900ºC são decorrentes do processo de descarboxilação, que é a decomposição de produtos a base de carbono, como por exemplo o carbonato de cálcio $Ca(CO_2)$, proveniente do processo de carbonatação. Resultados semelhantes foram observados por (Soares, 2017) e (Lawrence, 2006).

Com base nesta análise, pode-se observar que as amostras do C, teve um pico bem mais significativo que a B que por sua vez também teve um pico mais significativo do que a amostra A na curva da DTG entre as temperaturas de 600ºC a 900ºC. E podemos também observar que as mesmas amostras apresentaram picos cada vez menores na ordem da amostra A para a C, para as temperaturas de 350º a 550ºC. Este fato ocorre com justificativa no fenômeno da carbonatação, ou seja, a amostra C carbonatou mais do que a amostra B que por sua vez carbonatou mais do que a amostra A, conferindo maiores formações de $Ca(CO_2)$ e uma redução de $Ca(OH_2)$.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e analises discutidos nesta pesquisa, pode-se tirar as seguintes conclusões:

É sugerido que o resíduo utilizado a base de PVR deva ser caracterisado quanto a a sua resistência hidrolítica. O vidro é um material inerte, sem ação pozolânica e que em função de sua resistência hidrolítica pode ser facilmente afetado pela presenção da agua presente no concreto. O ataque do vidro pela água, conhecido como ataque hidrolítico, ocorre com a substituição dos íons alcalinos existentes no vidro por H+ e fazendo com que este vidro se torne solúvel na água. Este fenômeno pode gerar um aumento na porosidade do concreto e comprometer propriedades tais como, resistência mecânica, absorção de água, resistência a agentes agressivos. Dessa forma, a escolha do PVR em proporções acima de 20% não são satisfatórias, pois todas estas propriedades são comprometidas.

A falta de cimento das amostras B e C também são responsáveis pela má aglomeração entre as partículas, formação de poros e vazios o que comprometeu as propriedades significativamente.

Entretanto, a utilização do PVR nas proporções de 20% e 40% em substituição ao percentual de cimento não é indicada.

De forma a viabilizar a utilização deste resíduo, dando a ele uma destinação adequada e reaproveitando na construção civil, sugere-se para trabalhos futuros a realização de pesquisas com adições de até 5% a 10% mas, não em substituição no percentual de cimento, e sim na areia. Objetivando assim buscar suprir as deficiências relatadas nesta pesquisa para os traços estudados. A não diminuição no percentual de cimento beneficiaria a hidratação e a formação dos C-S-H juntamente com o PVR sendo adicionado como um agregado miúdo que, dependendo de sua resistência hidrolítica poderá funcionar como um micro agregado, conferindo maiores resistências mecânica e tornando o concreto mais impermeável ou por outro lado, caso este vidro tenha uma baixa resistência hidrolítica, o PVR funcionar como um aditivo formador de poros, produzindo concretos mais leves que podem ser utilizados como enchimento, isolamento térmico e ou acustico.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCB (Manual de Procedimentos Técnicos).

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos: NBR-5739/2007.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos: NBR-6118/14 2014.

[4] FORNASIER, R.S. (1995), "Porosidade e Permeabilidade do Concreto de Alto Desempenho com Microssilica", Dissertação de Mestrado, CPG EC - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre.

[5] HANNING, E. et. al. (2019), “Glass-ceramic produced with recycled glass”, Revista Matéria. RJ: UFRJ, v.24, n.04. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/index. Acesso em: 20 ago. 2021.

[6] HELENE, Paulo R. L. Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto Armado São Paulo tese (Livre Docência) Escola Politécnica.pp.241,1993.

[7] LIMA, J.S. et. al. (2021), “Use of rice husk ash to produce alternative sodium silicate for geopolymerization reactions” SP: Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0366-69132021673812891. Acesso em: 22 jul. 2021.

[8] NEVES, Ítalo B.F. (2005), “Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina”. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA faculdade de tecnologia departamento de engenharia civil e ambiental.

[9] SENFF, Luciano (2005), “Hidratação do cimento CP V ARI – RS: Influência da água nas reações de hidratação”. 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, São Paulo.

[10] SILVA, Romário A.P. (2005), “determinação da relação água/cimento utilizando micro-ondas”. Escola de engenharia programa de pós-graduação em engenharia de estruturas, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

[11] SOARES, Elizeth N.C. (2017), “Avaliação da atividade pozolânica das cinzas do capim elefante por análise termogravimétrica e ensaio de variação de condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio”. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

[12] TANG, L.; Sørensen H. E. “Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete”. TECHNICAL REPORTS. Sweden / Denmark, Vol. 34, October 2001, pp 479-485.

Capítulo 10

Effect of the hot mix asphalt types on rutting properties: identifying significant factors over the pavement performance

Vivian Silveira dos Santos Bardini
Jose Leomar Fernandes
Luis Miguel Gutiérrez Klinsky
Tiago Simione Azzoni
Mirela Beatriz Silva
Adriano Bressane

Abstract: The different characteristics of an asphalt mixture affect the pavement, but the knowledge about a more particular relationship of these characteristics with the properties of the groove is still very exploratory. The present study analyzed the relationships of hot mixed asphalt (HMA) properties with mating susceptibility as measured by the uniaxial compression creep test. Therefore, the effects of asphalt binder materials, type of aggregate, type of mineral filler and amount of filler on the performance of the pavement were evaluated, in order to identify the factors and significant interactions, in order to support the obtaining of models for the process in study.

Keywords: Hot asphalt mix; groove properties; pavement performance.

1. INTRODUCTION

Two of the major structural distresses in asphalt pavements in Brazil are rutting and fatigue crack, each one associated with different stage of pavement service life. Rutting often appear in the early years, before the hardening that go along to the aging process of the asphalt pavement, caused by consolidation or plastic break shear, and can also be derived from high traffic loads associated with high temperatures. The fatigue crack normally appears when the asphalt pavement is aged, after being submitted to cyclic traffic loads, may also occurs when the appropriated materials are not used or the correct design is not done.

In order to minimize the traffic and environmental effects and the distress occurrence in the asphalt pavement, many researches have tried to guarantee the proper behavior of the materials in the asphalt mixtures, as well as their interaction, so that the specified properties are attained. Ruts are longitudinal depressions molded in the wheel paths of flexible or composite pavements which are an accumulation of small amounts of unrecoverable deformation caused by each load application, and result from compaction or lateral migration of one or more of the pavement materials under the action of traffic and environment [4].

It has been reported that rutting increases with an increase in temperature, even under well controlled loading conditions and asphalt mixtures built up more resistant to flow during the process of deformation under repetitive loading. If an asphalt material is loaded with a stress that is above the flow strength of the material, at that temperature the material will start to deform, known as creep. Rutting can occur due to unstable mixes, consolidation under traffic loading, stripping in the HMA, or higher wheel loads or tire pressures than those consider in design [4]. This failure mode results in a loss of serviceability of the HMA pavement, and can represent certain safety risks as well [5].

Binder and aggregate characteristics are believed to affect the rutting performance of asphalt pavements. Experience shows that stiff binders with large aggregates typically are more resistant to rutting than mixes containing finer aggregates and higher binder contents [6]. A properly designed HMA mixture possessing a strong interlocking aggregate structure combined with a binder of adequate stiffness can significantly reduce a pavement's susceptibility to this type of rutting failure [7].

Among many factors can affect the shear resistance of a mix, the asphalt binder is one the main factor. Binder film thickness should be adequate for coating the aggregate and providing cohesion, but too much binder can actually have a lubricating effect, reducing the effectiveness of the aggregate skeleton and creating an unstable mix that is likely to premature rutting [8]. Binder grade can also affect rutting performance. In general, the higher the binder grade, the stiffer the binder, and the greater the rutting resistance [9]. Aggregate properties are important as well. In fact, it has been shown that the rutting resistance of a mix may be enhanced more by strengthening the aggregate gradation than by changing the binder grade or content. Additionally, the nominal maximum aggregate size can affect wheel tracking test results; typically mixes with larger aggregates are more resistant to rutting.

Volumetric properties of the asphalt mixture may also affect rutting, such as voids in the mineral aggregate (VMA) and voids filled with asphalt (VFA). By providing appropriate VMA, it is believed that rutting may be minimized, and mixture durability will be enhanced. However, studies have reported that increased values of VMA may actually have a negative impact on pavement performance with respect to rutting [10]. Both VMA and VFA may be important characteristics, but it is important to remember that these values are functions of other, more fundamental, properties of the asphalt mixture.

Compaction characteristics, characterized by the rate of densification during laboratory compaction, can also provide information relative to a pavement's resistance to permanent deformation. In theory, the greater the compaction effort required to compact a sample, the greater its shear resistance. Compaction criteria have been specified by Superpave mixture design methods in order to avoid tender mixes and mixes susceptible to rutting. As a specimen approaches the maximum allowable density at the end of the compaction process, rutting may be more pronounced [6].

Besides parameters such as aggregate grading and binder type which affect mix stiffness, there are also the effects of the filler present on the mix behavior. This component, besides to filling the voids, interacts with the binder present in the mix making it stiffer and brittle. The change in mix properties is closely related to the properties of the filler [3].

According to Bolk et al. [11] the asphalt binder content has much greater effect on the creep stiffness than the filler content has. With the increase of the asphalt binder content, the creep stiffness decreases considerably. The type and nature of the fillers also affect the creep stiffness of the mixture. Analyzing the wheel tracking test, the asphalt content is found to have a substantially greater effect than the filler

content on the deformation resistance. The extent of the effect is, however, dependent on the type and nature of the filler. Though many factors are known to contribute to rutting, the precise relationships between aggregate/binder/filler interactions and rutting characteristics are still unknown.

From the foregoing, this study aims to evaluate the rutting resistance of different types of asphalt mixture measured by uniaxial static creep test. For that, the laboratory data were statistically analyzed and the results used for modeling HMA mixtures. The hot mix asphalt mechanical behavior was evaluated according to experimental variables chosen to be the important factors that influence the rutting on HMA: the filler type and content (different physical, geometrical and mineralogical properties); the aggregate type (different mineralogical source); and the asphalt binder type (different consistency).

2. MATERIALS AND METHODS

To this research, it was used basaltic and granite aggregate, from Bandeirantes and Sao Jeronimo quarries in Brazil, respectively. The aggregate properties were determined by specific gravity (apparent and bulk) and absorption of coarse and fine aggregate. The tests results are shown in Table 1.

Table 1. Physical Properties of Aggregates

Test	Coarse 1	Coarse 2	Fine	Mineral filler	
Apparent specific gravity (g/cm³)	2.965	2.976	3.068	2.853	Basaltic Aggregate
Bulk specific gravity (g/cm³)	2.828	2.810	2.844	-	
Absorption (%)	1.635	1.986	2.570	-	
Apparent specific gravity (g/cm³)	2.635	2.622	2.661	2.538	Granite Aggregate
Bulk specific gravity (g/cm³)	2.601	2.567	2.487	-	
Absorption (%)	0.496	0.815	2.627	-	

The aggregate gradation was determined using the sieves recommended by Superpave specification, with sieve size of 0.075 mm, 0.15 mm, 0.30 mm, 0.60 mm, 1.18 mm, 2.36 mm, 4.75 mm, 9.5 mm, 12.5 mm, 19.0 mm, and 25.0 mm. The aggregate sieving was completely handmade, so that the error was minimized, thus the specimen characteristics are as similar as possible. The aggregates gradations are presented in Table 2.

Table 2. Aggregates gradations

Sieve size (mm)	Coarse 1	Coarse 2	Fine	Coarse 1	Coarse 2	Fine
		Basalt			Granite	
25	100	100	100	100.0	100.0	100.0
19	84.89	100	100	100.0	100.0	100.0
12.5	9.47	100	100	25.55	100.0	100.0
9.5	0.85	100	100	8.49	99.2	100.0
4.75	0.00	28.15	96.60	0.00	32.86	98.00
2.36	0.00	0.00	66.16	0.00	2.24	75.00
1.18	0.00	0.00	43.29	0.00	0.40	55.00
0.6	0.00	0.00	30.99	0.00	0.00	40.00
0.3	0.00	0.00	23.81	0.00	0.00	29.00
0.15	0.00	0.00	15.85	0.00	0.00	17.00
0.075	0.00	0.00	10.39	0.00	0.00	9.60

Two asphalt binders, with penetration of 50/70 (0.1 mm) and 85/100 (0.1 mm), and three fillers, Portland cement, limestone and hydrated lime were selected for this study. The characteristics of the binders and the fillers are presented in Table 3 and 4, respectively.

Table 3. Physical Properties of the Asphalt Binder

Test	AC 50/70	AC 85/100	Unit
Penetration	50	102	0,1 mm
Softening Point	48.6	43.5	˚ C
Brookfield Viscosity135 ˚ C	377	252.5	cP
Brookfield Viscosity 150 ˚ C	187	130	cP
Brookfield Viscosity177 ˚ C	69	52.5	cP

Table 4. Mineral Fillers Properties

Mineral Filler	Specific gravity (g/cm^3)	Specific Surface (cm^2/g)
limestone	2.749	2800 – 3500
hydrated lime	2.350	5000 - 15000
Portland cement	3.030	2200 – 2750

A factorial programming of laboratory tests was developed to determine the rutting properties of hot mix asphalt. With the tests responses average total deformation (Dt), flow modulus after recovery period (Mf), and slope of the secondary stage of the curve of deformation versus loading time (S_{curve}), which are associated to the rutting susceptibility. Moreover, in order to quantify the effects of the materials in HMA and their interactions subsequently included in performance models which best represent those effects on the rutting performance, it is used a simple tool, but with a great potential for the analysis of problems with several factors involved and complex interaction between them: the factorial experiments.

When programming the experiments, it is established which and how the input variables of the system must be arranged, in order to allow the identification of the causes of changes in the output variables of the system. A well-planned experiment is able to quantify the influence of each of the input variables and their interactions on system responses, with a number of assays not exceeding enough and necessary.

Only those factors considered to be the most important for pavement performance are adopted, at levels that cover the range of usual values and also allow non-linear models to be obtained. The selected factors, with their respective levels, were: type of aggregate: basalt and granite; type of asphalt binder (50/70 PEN and 85/100 PEN); type of mineral filler: hydrated lime, limestone and Portland cement; and Mineral filler content.

In order to facilitate calculations, materials and corresponding levels are represented by:

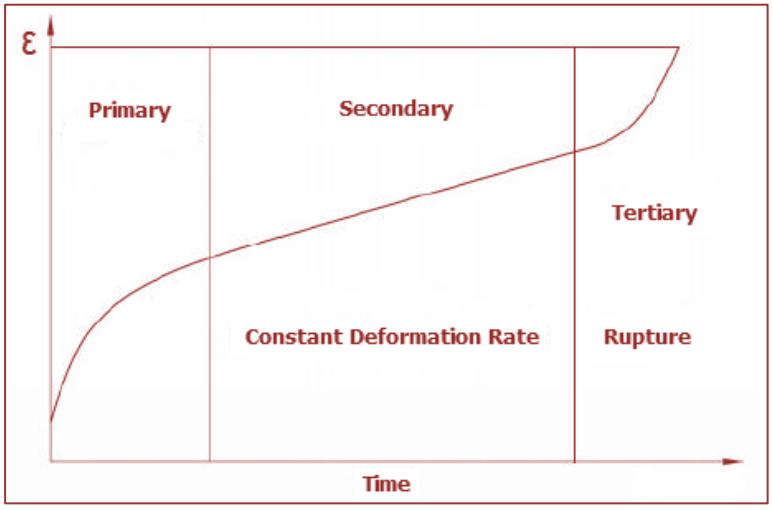
Factor A: type of aggregate	**Factor C: type of mineral filler**
Level a_-: basalt	Level c_0: limestone
Level a_+? granite	Level c_1: hydrated lime
	Level c_2: Portland cement
Factor B: type of asphalt binder	**Factor D: filler content**
Level b_-: 50/70 PEN	Level d_0: 2,5%
Level b_+: 85/100 PEN	Level d_1: 5,0%
	Level d_2: 7,5%

Static creep test was used to assess the susceptibility of the HMA to permanent deformation under different loading conditions and temperature. Little et al. [12] developed criteria to evaluate the potential of asphalt concrete to permanent deformation through the creep test by uniaxial compression, which, according to them, is sufficient to identify the sensitivity of HMA to permanent deformation. The test is sensitive to the mixture variables such as asphalt binder type and content, aggregate type, air void, test temperature and stress state.

The test consists of a uniaxial repeated load compression of 0.1, 0.4 or 0.7 MPa in a cylindrical specimen, which represents the average stress at the center of an asphalt layer in service. It is performed at 40 ° C with one hour of load application and 15 minutes of recovery, and carried out a preconditioning by applying the test load for 5 minutes, followed by a rest period (recovery) for 5 minutes. Readings are performed along time of axial displacements and load, to obtain the following data: total deformation, recoverable deformation, not recoverable deformation, recovery, flow (creep) modulus at 3600 seconds and 4500 seconds and the slope of the secondary stage of creep curve.

Figure 1 shows the graph of deformation versus loading time, obtained in the static creep test, where can be seen three phases: primary, secondary and tertiary. In the primary stage the initial slope of the curve is high; the deformation rate grows rapidly with the loading time, due to high deformation in a short time. The secondary stage is identify by the constant deformation grow rate, that is identify in the curve by the constant slope. The tertiary stage is characterized by the sudden growth of permanent deformation until the specimen rupture.

Figure 1. Representation of the deformation stages in the static creep test



Through the static creep test it is possible to obtain indicators that allows the analysis of the asphalt mixture sensitivity to permanent deformation, which are: average total deformation during the whole test (4500 seconds) (Dt), Equation 1, flow modulus after recovery period (4500 seconds) (Mf), Equation 2, and slope of the secondary stage of the curve of deformation versus loading time (S_{curve}), Equation 3.

$$D_t = \Delta h_{4500}/h_0 \quad \text{Equation 1}$$

$$M_f = \sigma/D_t \quad \text{Equation 2}$$

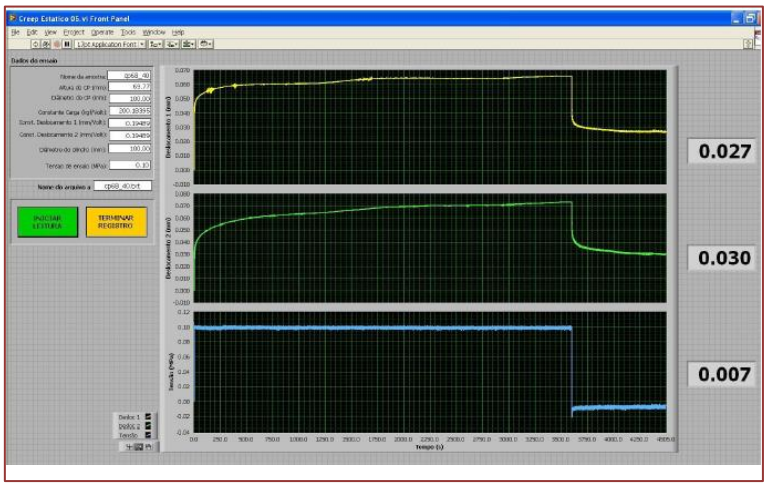
$$S_{curve} = (log\varepsilon_{3600} - log\varepsilon_{1000})/(log3600 - log1000) \quad \text{Equation 3}$$

where:

D_t: total deformation (mm/mm);
Δh_{4500}: variation of the specimen height, after recovery period (4500 seconds);
Δh_0: initial specimen height (mm);
Mf: Flow Modulus after recovery period (4500 seconds);
σ: applied stress;
ε_{3600}: deformation at 3600 seconds of the test;
ε_{1000}: deformation at 1000 seconds of the test.

The static creep test management was done through the software Labview 7.1, that allows the applied loading control, which is measured by a strain gage, and permits the access to the displacement readings during the test. The Figure 2 shows the complete test screen.

Figure 2. Complete static creep test screen



3. RESULTS AND DISCUSSION

The static creep test results analysis to four parameters: (a) not recoverable deformation, or viscoelastic deformation, that remains in the specimen after the recovery test; (b) elastic recovery, that is the relation between the total deformations and the recoverable deformation; (c) flow modulus after the creep test; (d) slope of the curve of deformation versus loading time. The Figure 3 and 4 show the not recoverable deformation of the HMA containing asphalt binder AC 50/70 and AC 85/100, respectively, for mixtures composed by the different aggregates, basalt (a) and granite (b).

Figure 3. Not Recoverable Deformation of mixture containing AC 50/70 and: (a) basalt; (b) granite

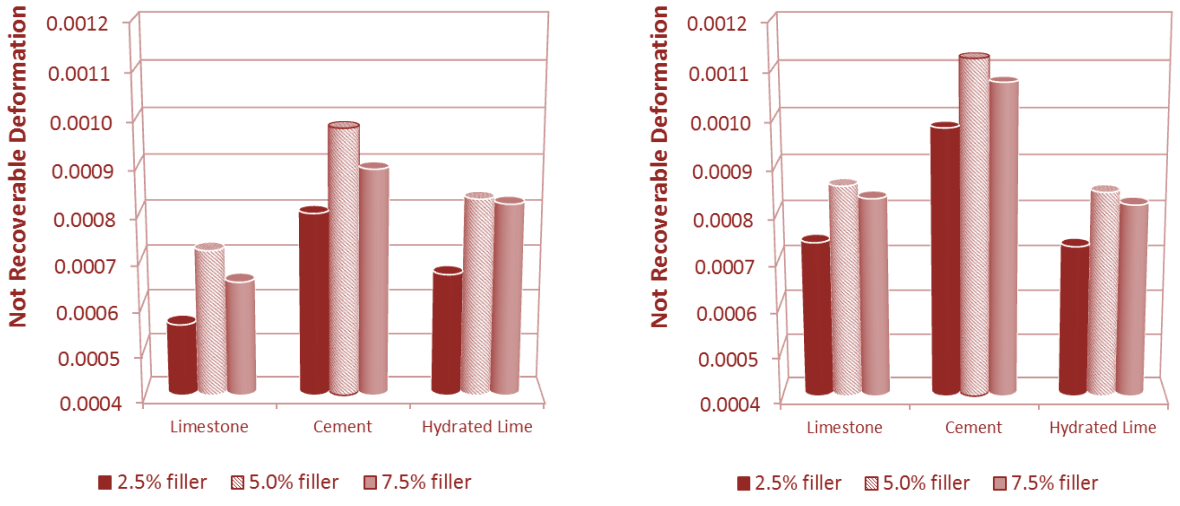
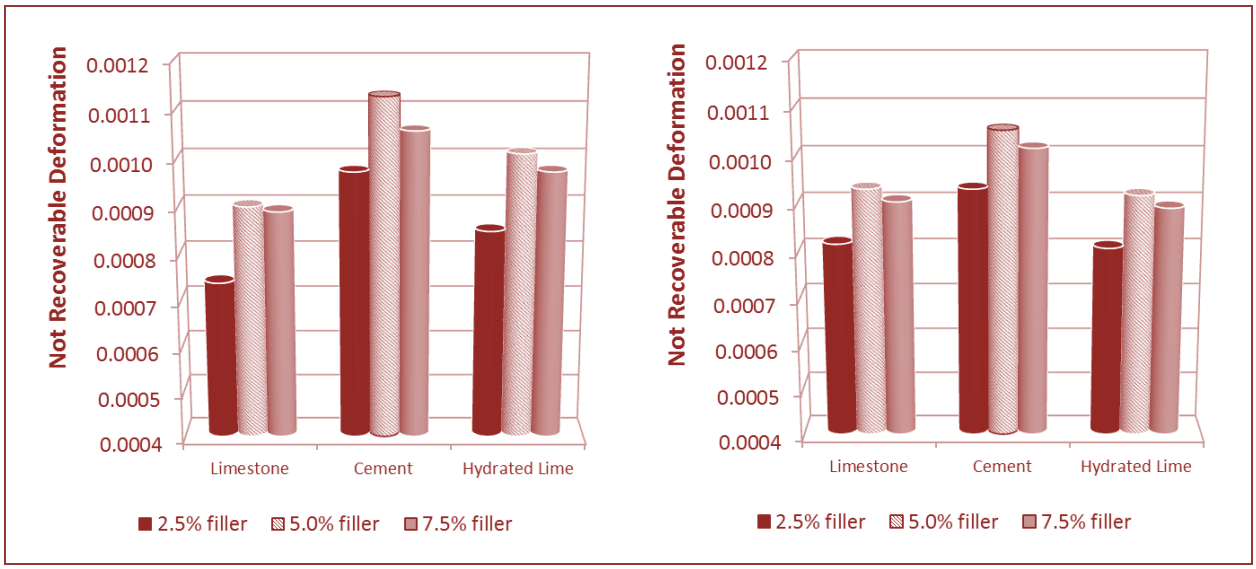


Figure 4. Not Recoverable Deformation of mixture containing AC 85/100 and: (a) basalt; (b) granite



It can be noted that mixtures composed by the AC 50/70 and basaltic aggregate presented the lowest values of not recoverable deformation. Regarding to the filler type, mixtures containing Portland cement presented the highest values of not recoverable deformation, and for all filler type, the mixtures with lower content of filler presented the lower not recoverable values, whereas the intermediate content (5.0%) presented the highest values.

The Figure 5 and 6 show the elastic recovery (%) of the HMA containing asphalt binder AC 50/70 and AC 85/100, respectively, for mixtures composed by the different aggregates, basalt (a) and granite (b).

Figure 5. Elastic Recovery of mixture containing AC 50/70 and: (a) basalt; (b) granite

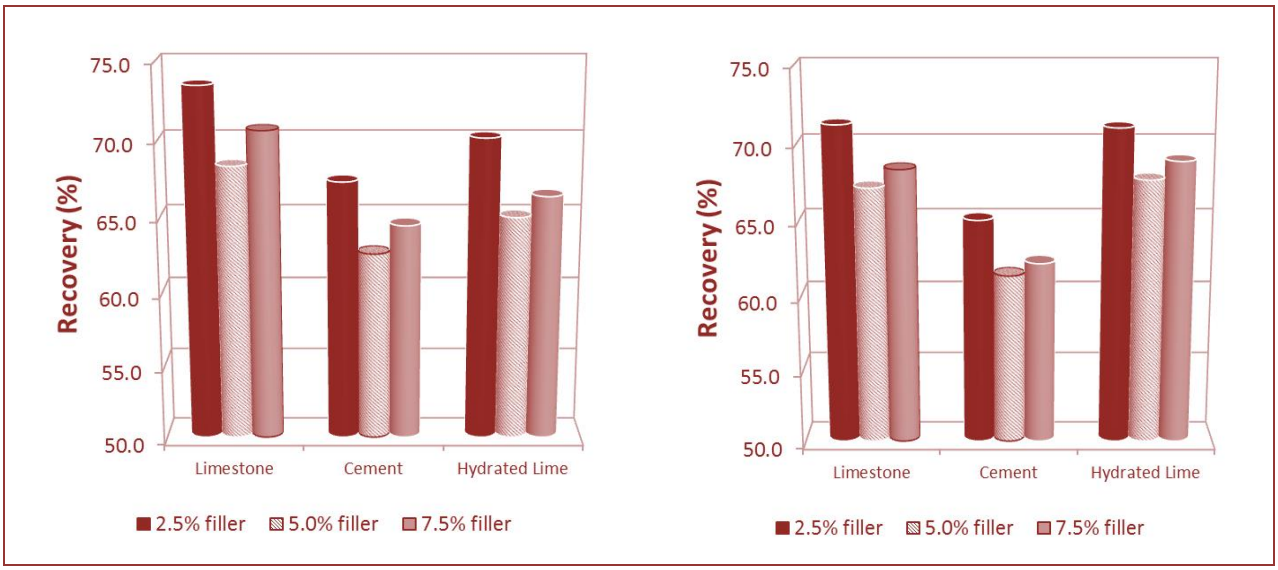
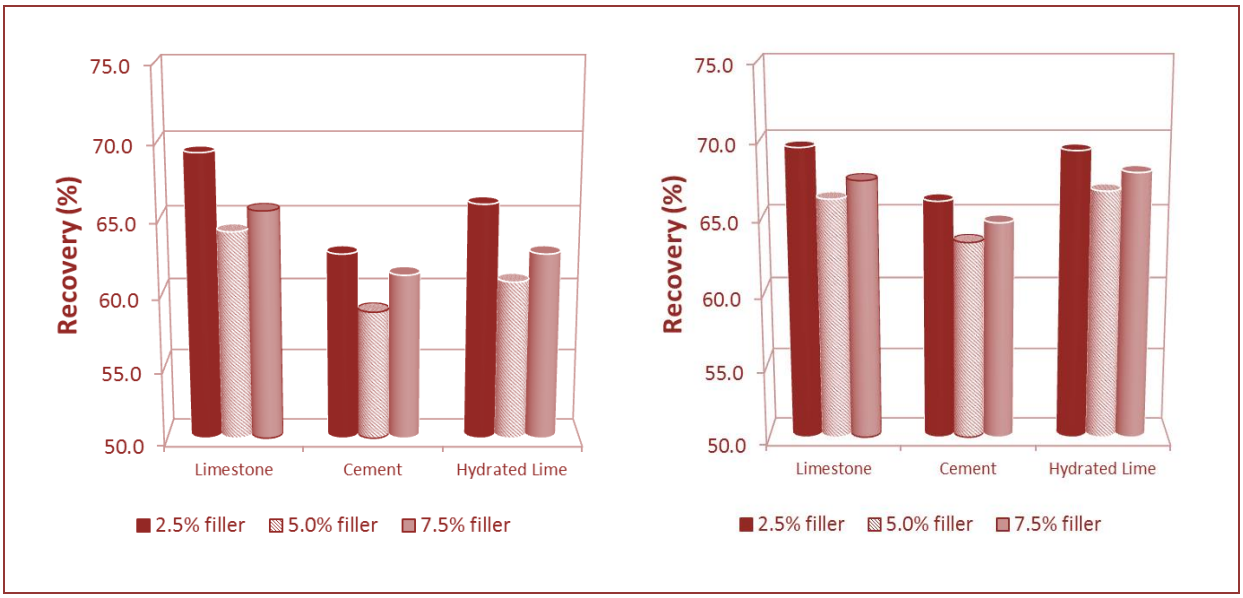


Figure 6. Elastic Recovery of mixture containing AC 85/100 and: (a) basalt; (b) granite



It can be notice that mixtures containing asphalt binder AC 50/70 presented the highest recovery values, when compared with the AC 85/100 ones. Regarding to the filler type, the mixtures composed with limestone powder presented the highest recovery values, while the ones with the Portland cement filler presented the lowest values. About the filler content, mixtures with the lowest filler content presented the highest recovery values, while the intermediary contents (5.0%) presented the lowest values.

The Figure 7 and 8 show the flow modulus after recovery period (4500 seconds) (%) of the HMA containing asphalt binder AC 50/70 and AC 85/100, respectively, for mixtures composed by the different aggregates, basalt (a) and granite (b).

Figure 7. Flow Modulus of mixture containing AC 50/70 and: (a) basalt; (b) granite

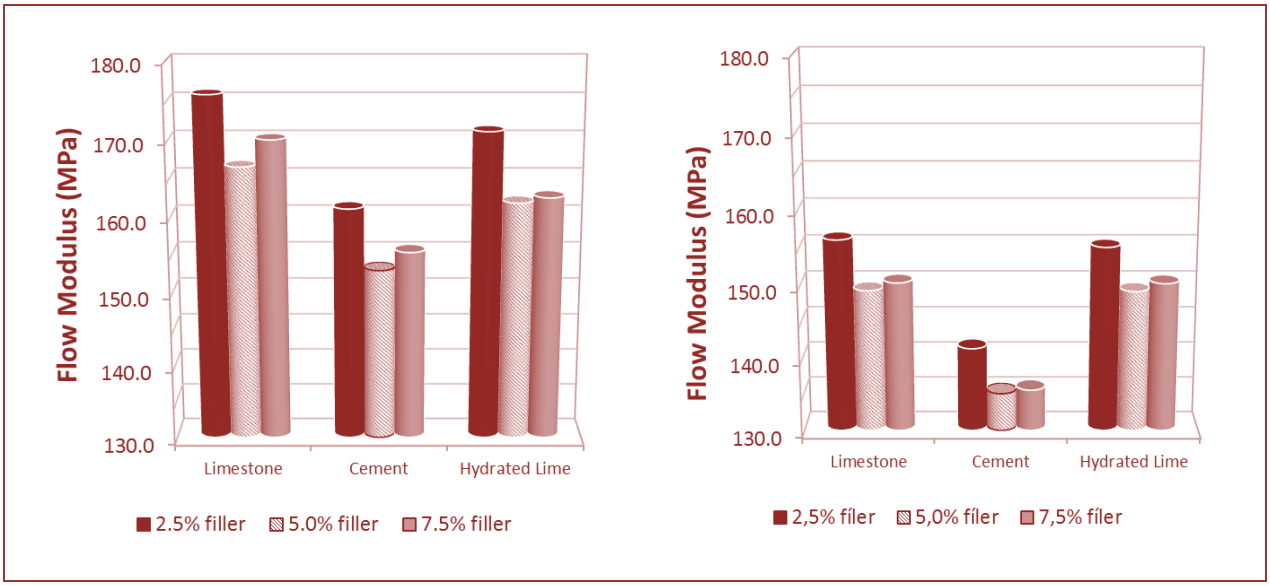
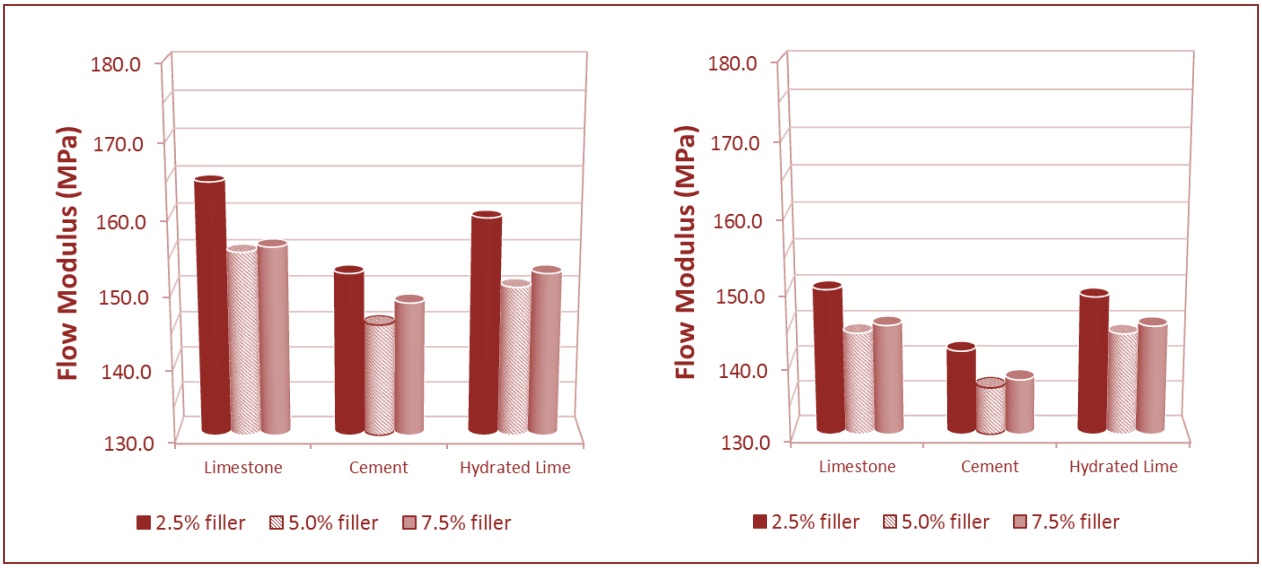


Figure 8. Flow Modulus of mixture containing AC 85/100 and: (a) basalt; (b) granite



It is observed that mixtures composed by the basaltic aggregate presented the highest flow modulus values, when compared to the composed by the granite aggregate. Mixtures composed by the AC 50/70 asphalt binder presented highest flow modulus values, compared to the one composed by the AC 85/100. Regarding to the filler type, mixtures containing Portland cement filler presented the lowest flow modulus values, while the ones containing limestone powder presented the highest values. About the filler content, mixtures containing the lowest filler content presented the highest flow modulus, and to for 5.0 and 7.5% presented values nearly equal.

The Figure 9 and 10 show the slope of the curve of the secondary stage of deformation versus loading time of the HMA containing asphalt binder AC 50/70 and AC 85/100, respectively, for mixtures composed by the different aggregates, basalt (a) and granite (b).

Figure 9. Slope of mixture containing AC 50/70 and: (a) basalt; (b) granite

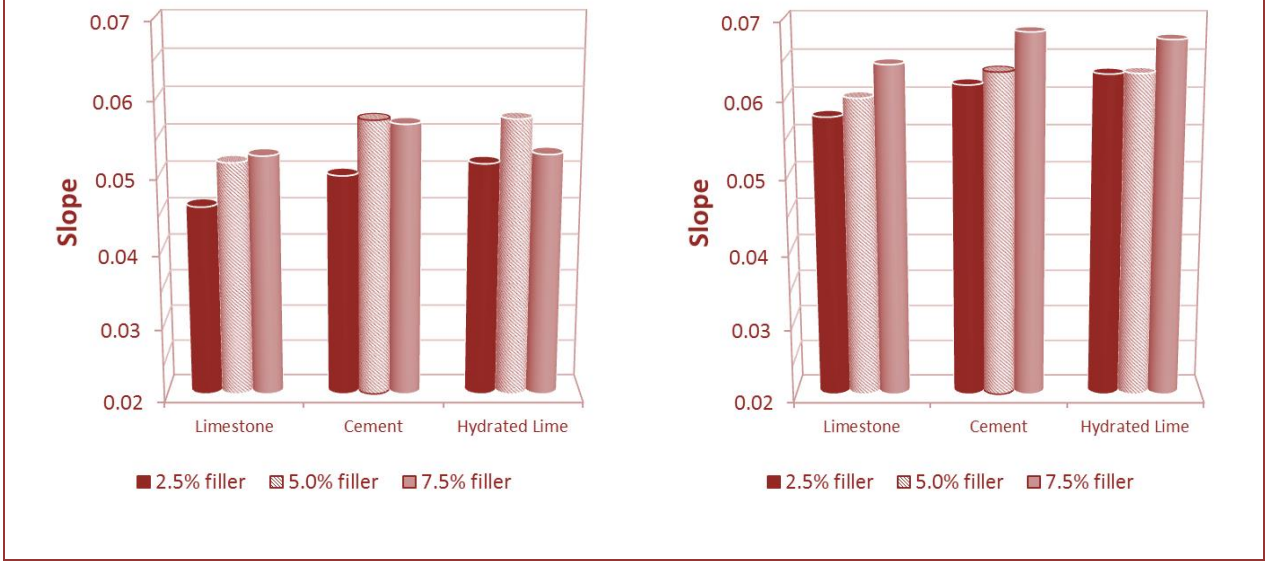
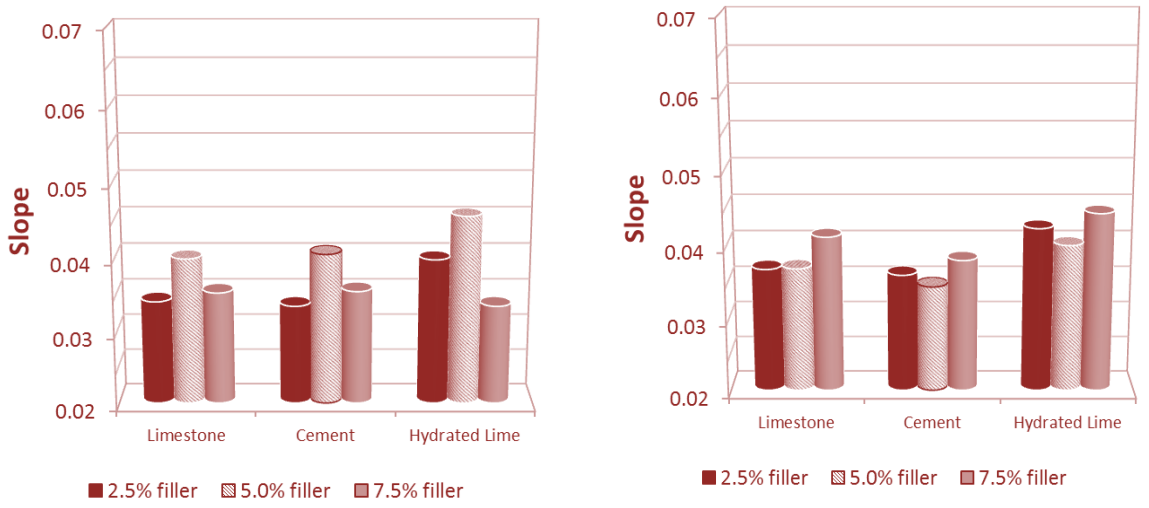


Figure 10. Slope of mixture containing AC 85/100 and: (a) basalt; (b) granite



It can be notice that mixtures composed by the AC 50/70 asphalt binder presented the highest slope values. About the aggregate type, when combined with AC 50/70 mixtures composed by the granite presented the highest values, for the ones with AC 85/100, the mixtures composed by the different aggregates did not presented significantly slope value difference. Regarding to the filler type, mixtures containing limestone powder presented the lowest slope values, when combined to the AC 50/70; but the mixtures composed by AC 85/100, the ones containing Portland cement filler presented the lowest slope values. About the filler content, mixtures containing the lowest filler content presented the lowest slope values.

4. CONCLUSIONS

Analyzing the static creep test parameters, a mixture has the best rutting performance if present:

- Lower not recoverable deformation
- Higher recovery
- Higher flow modulus
- Lower slope.

By this, it can be concluded that:

- Mixtures that are more resistant to rutting are the composed by the basalt aggregate, AC 50/70 asphalt binder, and containing the limestone filler and lower filler content
- Other mixture that presented a good performance to rutting are a combination of the Portland cement filler and the AC 85/100 asphalt binder, and mixtures containing hydrated lime, when it is analyzed the not recoverable deformation
- In general, the mixtures that presented the worst values of the static creep parameters was the containing Portland cement.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank the Brazilian promoting agency CNPQ ("National Counsel of Technological and Scientific Development") for the PhD scholarship given.

REFERENCE

[1] TUNNICLIFF, D. G. (1962). "*A Review of Mineral Filler*" Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists. v. 31, pp. 118 – 150.

[2] CRAUS, J.; ISHIAI I.; SIDES A. (1978) "Some Physico-Chemical Aspects on the Effect of the Filler on the Properties and Behavior of Bituminous Paving Mixtures," Asphalt Paving Technology, Vol. 47, pp. 558-588.

[3] KAVUSSI, A.; HICKS, R.G. (1997) Properties of bituminous mixtures containing different fillers. Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists.

[4] ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.Y.; KENNEDY, T.W. (1991) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. 1°ed. NAPA Research and Education Foundation, National Center for Asphalt Technology – NCAT. Lanham, Maryland, EUA.

[5] WILLIANS, S. G. (2003) "The Effects of HMA Mixture Characteristics on Rutting Susceptibility". Transportation Research Record #1767, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

[6] KANDHAL, P.S.; MALLIK, R.B. (2001) "Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense-Graded Asphalt Mixtures", Transportation Research Record #1767, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

[7] ASPHALT INSTITUTE (1996) "Superpave Mix Design", Superpave Series No. 2 (SP-2), Lexington, Kentucky, 1996.

[8] BROSSEAUD, Y., DELORME, J.L.; HIERNAUX, R. (1993) "Use of LPC Wheel-Tracking Rutting Tester to Select Asphalt Pavements Resistant to Rutting", Transportation Research Record #1384, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

[9] NETEMEYER, R.L. (1998) "Rutting Susceptibility of Bituminous Mixtures by the Georgia loaded Wheel Tester", Missouri Department of Transportation, Field Office Investigation F.O. 95-06, SPR Study No. SPR 96-03, Jefferson City, Missouri, May, 1998.

[10] ANDERSON, R.M.; BENTSEN, R.A. (1996) "Voids in the Mineral Aggregate (VMA) on the Mechanical Properties of Coarse and Fine Asphalt Mixtures", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 70.

[11] BOLK, N.J.N.A; VAN DER HEIDE, J.P.J.; VAN ZANTVLIET, M.C. (1982) "Basic Research Into the Effect of Filler on the Mechanical Properties of Dense Asphaltic Concrete". Proceedings of Asphalt Association of Paving Technologists AAPT v51 p.398-451.

[12] LITTLE, D.N.; BUTTON, J.W.; YOUSSEF, H. (1993) "Development of Criteria to Evaluate Uniaxial Creep Data and Asphalt Concrete Permanent Deformation Potential". Transportation Research Record 1417, p.49-57.

Capítulo 11

Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos de acordo com as alternativas propostas pela ANEEL

Victor Rodrigues de Lima
Fernando Nunes Belchior
José Eduardo Stort Fernandes
José Luis Domingos

Resumo: O investimento em geração distribuída tem se tornado uma das principais alternativas para mitigar os efeitos financeiros causados pelos crescentes reajustes nas tarifas elétricas no Brasil. Dentre as opções disponíveis, a energia solar fotovoltaica se apresenta como principal fonte para a geração de energia de forma distribuída, contabilizando um total de 97,4 % da potência instalada nesta categoria. No entanto, a crescente no mercado da energia solar fotovoltaica ocorre em meio às incertezas geradas pela véspera de um marco legal na regulamentação sobre a geração distribuída no país, na forma das alternativas de mudanças propostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica no sistema de compensação de energia elétrica e, do trâmite do Projeto de Lei 5829/2019 no poder legislativo brasileiro. Isto posto, o presente estudo busca avaliar o impacto das alternativas propostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica para a regulamentação da geração distribuída sobre o investimento em sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes regiões do Brasil. Para isto, foram selecionadas dez cidades no país para a instalação do sistema e levantadas as tarifas de energia praticadas pelas concessionárias e as irradiações solares médias nas respectivas cidades escolhidas. Com os dados levantados foram dimensionados sistemas para compensar faturas de energia cujo consumo seria suprido por sistemas de potência entre 4 e 7,99 kWp, a mais comercializada pelo mercado no primeiro semestre de 2021. Após os dimensionamentos, foram elaborados os fluxos de caixa dos investimentos para cada uma das alternativas de mudanças propostas e calculados os parâmetros financeiros para a tomada de decisão, como VPL, TIR e *payback* descontado. Os resultados obtidos mostraram baixa rentabilidade para as alternativas 3 e 4 e um elevado tempo de recuperação do investimento para as alternativas 1 e 2. Ao final, conclui-se que os investimentos ainda são rentáveis para a maioria das alternativas e cidades analisadas, porém, as alternativas de mudança propostas pelo Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018 podem prejudicar a expansão da geração distribuída devido a perda de atratividade pelas quedas nos índices do negócio.

Palavras-Chave: Análise de investimento, Compensação de energia elétrica, Energia solar fotovoltaica, Marco legal da Geração Distribuída, Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O mundo está enfrentando um período difícil, de muitas mudanças e inseguranças devido à pandemia de coronavirus, declarada pela Organização Mundial de Saúde em 11 de março de 2020 (Una-Sus, 2020) e que persiste até os dias de hoje. Diante de tal cenário, escolhas são pensadas e repensadas a todo momento, em prol de melhor adaptação a situação adversa.

No Brasil e no mundo a pandemia teve grande impacto sobre o setor elétrico. As quarentenas utilizadas buscando reduzir a transmissão do vírus forçaram as pessoas a ficarem mais em suas casas, muitos passaram a trabalhar através de *homeoffice*. Esta descentralização da concentração de pessoas elevou o consumo de energia elétrica, principalmente no ambito residencial (Diário Popular, 2021).

Em relação ao Brasil, este aumento no consumo ocorreu em contraste com a queda nos índices pluviométricos, que reduziram a geração de energia da principal fonte de geração da matriz elétrica brasileira, a energia hidroelétrica, que compõe aproximadamente 65 % da matriz (epe, 2021). Adicionalmente, a diminuição das precipitações causou um aumento na temperatura, o que por sua vez aumentou a utilização de aparelhos de ar condicionado em todo o país, e de acordo com a nova distribuição de pessoas, estando cada uma em suas casas ao invés de reunidas sob o mesmo teto do escritório, causou a ligação de ainda mais aparelhos que o previamente necessário, elevando ainda mais o consumo, em uma espécie de efeito bola de neve.

Diante de tal situação, um tipo de investimento ganhou cada vez mais força, a geração distribuída (GD). A GD consiste em gerar sua própria energia elétrica de forma distribuída, isto é, geradoras de menor porte próximas às cargas. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta a instalação de GD no Brasil, para geradores de energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, através da Resolução Normativa (REN) 482/2012 (ANEEL, 2012) e suas revisões como a REN 687/2015 (ANEEL, 2015), que foi a principal responsável para o crescimento da GD em larga escala no país.

A regulamentação supracitada permite aos consumidores que geram sua própria energia injetar o excedente gerado na rede elétrica, sistema de geração *on grid*, e acumular créditos de energia correspondentes. Estes créditos podem ser abatidos da energia consumida ao final de um ciclo de faturamento por meio do sistema de compensação de energia elétrica (SCEE), e, podendo inclusive ser utilizado para compensação de consumo de unidades consumidoras (UCs) diferentes da geradora dos créditos, através das modalidades autoconsumo remoto, empreendimentos de múltiplas UCs (EMUCs) e geração compartilhada, regulamentados pelas resoluções normativas citadas anteriormente.

Os investimentos em GD cresceram tão rapidamente, que o segmento se encontra no meio de uma disputa entre as concessionárias de energia e os consumidores, uma vez que a inserção massiva desta fonte, se não acompanhada da evolução regulatória, pode configurar em um problema econômico para as concessionárias e para os consumidores, uma vez que os clientes com GD não se desconectam da rede e a utilizam como uma espécie de bateria virtual. Este fato pode provocar a perda de receita das distribuidoras e aumento tarifário para os consumidores não cativos.

Em frente a esta disputa, a ANEEL publicou o Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018 (ANEEL, 2018), que além de propor novas alternativas para o sistema de compensação de créditos de energia, traz um estudo dos impactos da mudança na expansão da GD. As sugestões buscam balancear a perda de mercado alegada pelas concessionárias com os benefícios trazidos pela GD, de forma a não prejudicar nas perspectivas de crescimento da GD, importantes pois, a diversificação das fontes de geração de energia traz menor dependência da fonte majoritária, aumentando a confiabilidade e segurança do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Atualmente, a GD no Brasil se encontra à beira de um marco legal, causado pelo Projeto de Lei (PL) 5829/2019 (Câmara dos Deputados, 2019), que foi elaborado devido à disputa e ao relatório supracitados, e se encontra em trâmite no sistema legislativo brasileiro.

Diante das informações colocadas, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica da instalação de SFVs *on grid* em diversas regiões do país, considerando o cenário atual do SCEE, assim como os novos cenários gerados pelas alternativas propostas pela ANEEL no Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018, buscando trazer um complemento para o assunto frequentemente discutido como nos trabalhos citados anteriormente, fornecendo mais dados para facilitar tomadas de decisão sobre investimentos em SFVs no país em frente às possíveis novas realidades criadas pelas mudanças propostas pela ANEEL. Para tal, foram levantadas informações como as irradiações solares disponíveis e as tarifas cobradas pelas concessionárias das respectivas regiões. O estudo focou-se na análise de SFVs cuja potência do gerador fotovoltaico se encontra na faixa de 4 a 7,99 kWp, a mais comercializada pelo

mercado em 2021 (Greener, 2021).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos e informações bases utilizados ao longo da discussão.

2.1. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

"Geração Distribuída (GD) é o termo dado à energia elétrica gerada no local de consumo ou próximo a ele, sendo válida para diversas fontes de energia renováveis, como a energia solar, eólica e hídrica, trazendo inúmeros benefícios aos consumidores" (FOCUS, 2021). Dentre os benefícios trazidos pela implementação da GD, além da principal motivação do consumidor com este tipo de investimento, a economia financeira proporcionada, pode-se também destacar benefícios que se estendem além do consumidor, como a redução das perdas de energia nos alimentadores, a geração de empregos e a capacidade de energia aliviada, que pode ser usada pela concessionária para atender novos consumidores.

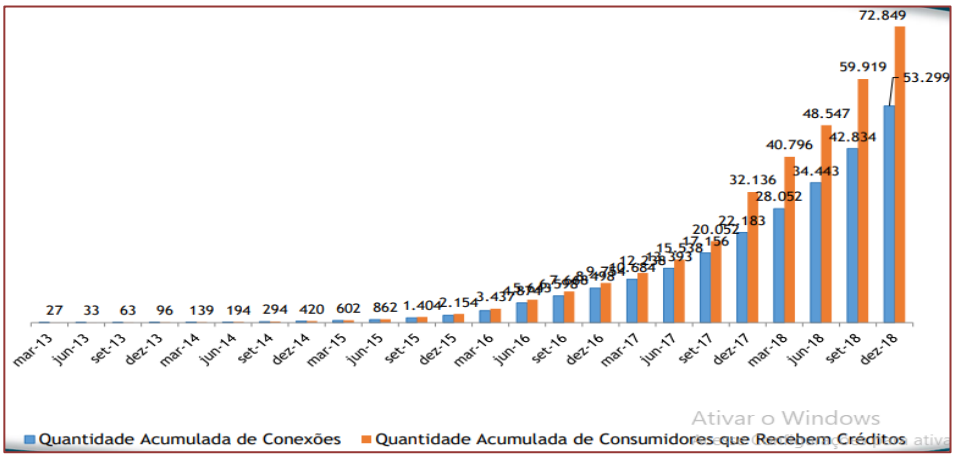
No Brasil, "a geração distribuída foi primeiramente descrita no Decreto Lei nº 5.163/2004" (ePowerbay, 2020). Desde então, passou por diversas regulamentações, como a REN ANEEL 482/2012, pontapé inicial para a aplicação em larga escala deste conceito. A partir desta resolução normativa, "o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade" (ANEEL, 2015).

Esta resolução regulamentou a micro e a minigeração distribuída, categorias dentro da modalidade GD, nas quais sistemas de geração de energia elétrica podem ser conectados à rede de energia da concessionária, e, através de um sistema de empréstimo e créditos de energia, utilizar os créditos gerados para reduzir o valor das faturas a serem pagas ao fim de cada período.

Quando entrou em vigor a REN ANEEL 482/2012, a microgeração distribuída compreendia sistemas de geração cuja potência instalada era de até 100 kW, enquanto a minigeração compreendia sistemas de potência instalada superior a 100 kW e inferior ou igual a 1 MW. Além disso, os créditos gerados que poderiam ser utilizados no abatimento do consumo de energia da unidade consumidora (UC), possuíam validade de 36 meses.

Entretanto, apesar da REN ANEEL 482/2012 entrar em vigor, a GD ainda não se mostrava atrativa ao mercado, sendo apenas implementada em larga escala, com a chegada da REN ANEEL 687/2015, que revisava a REN ANEEL 482/12. Na figura 1 pode-se visualizar o perfil de crescimento da GD no país a partir da regulamentação do segmento pela REN 482/2012.

Figura 11 - Perfil de crescimento da GD no Brasil



Fonte: ANEEL (2019)

As principais mudanças trazidas pela resolução normativa ANEEL 687/2015 foram:

I. É permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

II. Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. De acordo com as novas regras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado "autoconsumo remoto".

III. Com relação aos procedimentos necessários para se conectar a micro ou minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu regras que simplificam o processo: foram instituídos formulários padrão para realização da solicitação de acesso pelo consumidor e o prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias. (ANEEL, 2015).

Estas alterações foram essenciais para o aumento da atratividade do investimento em GD. Adicionalmente, as revisões da resolução normativa ANEEL 687/2015, trouxeram dois modelos novos para compensação dos créditos de energia, a geração compartilhada, que diz respeito à união de interessados, por meio de cooperativa ou consórcio, para instalarem uma GD e usufruírem dos créditos de energia partilhados entre os envolvidos, e a possibilidade de instalação de GD em condomínios (empreendimentos de múltiplas UCs), dividindo os créditos gerados entre os condôminos.

É importante notar que com as regulamentações supracitadas, também foram instituídos os custos de disponibilidade, os valores mínimos pelos quais as concessionárias devem ser remuneradas, em casos de geração superior ou igual ao consumo em um ciclo de faturamento. Estes valores correspondem à remuneração pelo uso da rede de energia da concessionária e variam conforme ao grupo e tipo de fornecimento. Para consumidores monofásicos o valor cobrado é de 30kWh, bifásico de 50kWh e trifásico de 100kWh.

Segundo dados da ANEEL, já são mais de 600 mil UCs que possuem GD instalada, e, quase 800 mil UCs que recebem créditos de energia (CSE Solar Energy, 2021).

2.2. SISTEMA FOTOVOLTAICO *ON GRID*

Devido às suas características, destacando-se a ampla disponibilidade da fonte de energia por todo o território nacional e sua praticidade de instalação, os sistemas de geração de energia baseados na energia solar, tiveram rapidamente os olhares do mercado direcionados a si. A figura 2 evidencia o papel de destaque exercido pela energia solar dentro do cenário da GD no Brasil.

A energia solar fotovoltaica (ESF) consiste em utilizar a irradiação solar captada pelos módulos fotovoltaicos, ou, como são popularmente conhecidos, painéis solares, para gerar energia elétrica, e então, através das diretrizes introduzidas pelas resoluções normativas da ANEEL, para economizar com a fatura de energia, por meio do sistema de compensação de créditos.

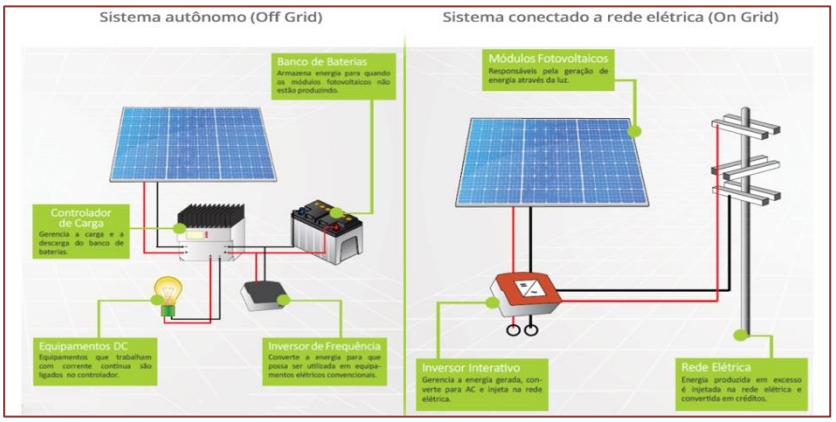
Figura 12 - Dados da Energia Solar na GD brasileira

Fonte: ABSolar (2021)

Dentro da ESF, existem dois modos de operação predominantes: *on grid* e *off grid*, cujas respectivas caracterísitcas são exibidas pela figura 3. No modo *on grid*, o sistema fotovoltaico (SFV) é conectado à rede de energia elétrica da concessionária de energia local, de forma que enquanto há geração suficiente, o SFV abastece a UC e, se houver sobra, esta é injetada na rede da concessionária. Quando não há geração suficiente, a UC consome energia da rede da concessionária e do SFV. Já no modo *off grid*, o SFV não é conectado à rede de energia da concessionária, sendo utilizado para fornecer energia para cargas isoladas, e, em caso de excesso de geração, esta é armazenada em algum sistema de armazenamento, na maioria das vezes, em baterias. Na ausência de geração suficiente, utiliza-se da energia armazenada em conjunto para atender o fornecimento solicitado.

Como a tecnologia de baterias ainda está em evolução e, atualmente, ainda não atingiu um patamar financeiro desejado, e, adicionalmente, muitas das vezes, os perfis de consumo das cargas não são coincidentes com o perfil da geração solar, o sistema *on grid* é aquele de maior utilização no momento. Esta consequência, também ocorre, devido ao sistema de compensação mencionado anteriormente, que pode ser enxergado como uma grande bateria virtual, como se os créditos de energia se comportassem como o armazenamento da energia excedente gerada, porém, sem a necessidade de investimento adicional no sistema de baterias.

Figura 13 - SFV *on grid* e *off grid*



Fonte: VEPO (2020)

2.3. COMPOSIÇÃO DA TARIFA DE ENERGIA

A atratividade da GD também depende, além dos aspectos técnicos para conexões, do retorno financeiro do investimento. Logo, para ser realizada uma análise mais precisa, é necessário entender um dos principais fatores que impactam no aspecto financeiro deste tipo de empreendimento, a tarifa de energia.

Simplificadamente, a tarifa de energia pode ser dividida em dois blocos. Os elementos que podem ser controlados ou gerenciados pela distribuidora, são denominados como Parcela B, e incluem custos operacionais e investimentos na rede elétrica. Os custos classificados como não controláveis ou gerenciáveis pela distribuidora, são denominados como Parcela A, e englobam custos referentes à transmissão, geração e encargos setoriais. A distinção entre as parcelas serve de base para os reajustes tarifários gerenciados pela ANEEL, tal que cada uma das parcelas é reajustada de acordo com critérios distintos, onde, por exemplo, a parcela B é reajustada com influência de índices de qualidade do serviço avaliados pela agência, visando o incentivo a melhor e mais eficiente operação das distribuidoras.

No modo geral, pode-se detalhar a tarifa como composição de dois grupos tarifários: a Tarifa de Energia (TE) e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD).

A figura 5 ilustra a composição da TE. A TE Energia se refere aos custos da energia contratada pelos leilões, geração própria e quotas das usinas.

TE Transporte refere se a remuneração do transporte de energia de Itaipu pela Rede Básica (PRORET, 2019).

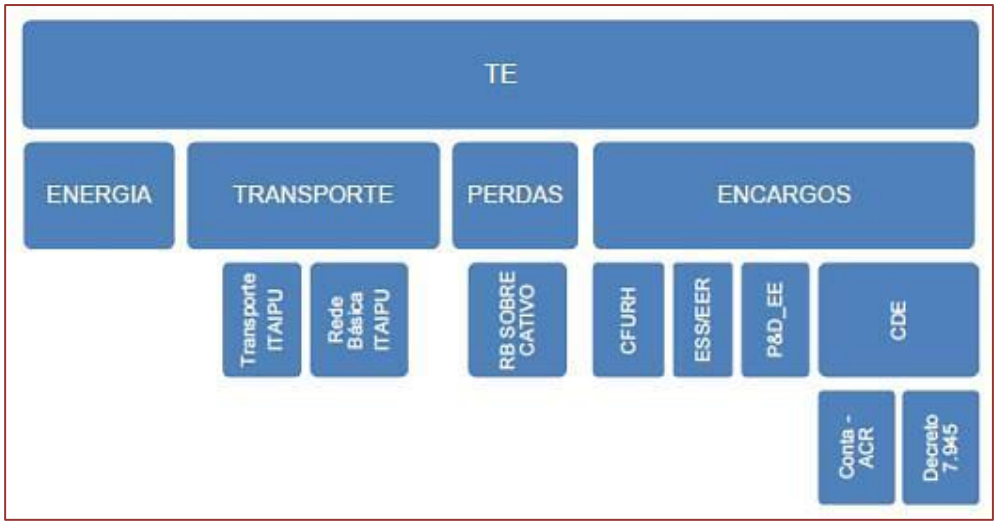
As perdas causadas por irregularidades compõem a TE perdas.

E, a TE Encargos, compreende os seguintes encargos setoriais:

1. Encargos de Serviços do Sistema – ESS e Encargo de Energia de Reserva EER;
2. Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – P&D_EE;
3. Contribuição sobre Uso de Recursos Hídricos – CFURH;
4. Quota da Conta de Desenvolvimento Energético – CDE.

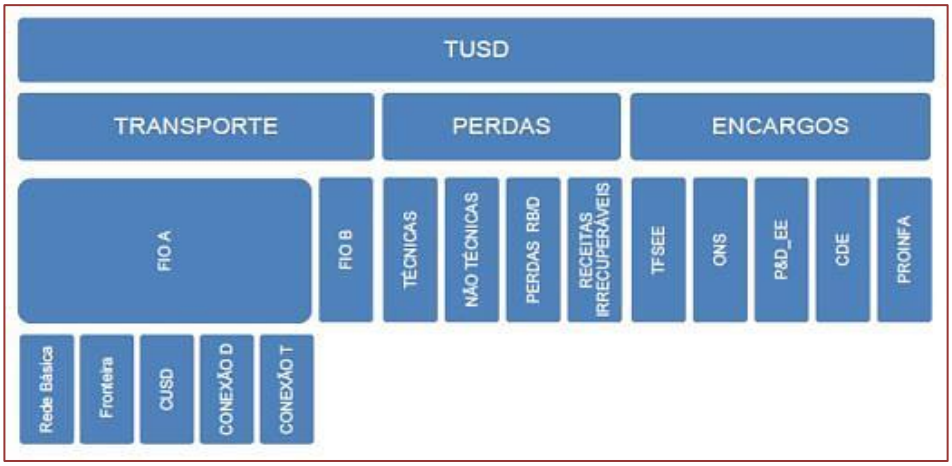
A composição da TUSD pode ser vista na figura 6.

Figura 14 - Composição da TE



Fonte: Módulo 7.1 PRORET,2019

Figura 15 - Composição da TUSD



Fonte: Módulo 7.1 PRORET, 2019

A TUSD Transporte refere-se aos custos de transporte por agentes exteriores às distribuidoras (TUSD Fio A) e também aos custos do transporte pela rede da própria distribuidora (TUSD Fio B).

A TUSD Perdas recupera custos referentes a perdas não técnicas (os índices são

definidos durante a revisão tarifária), perdas técnicas, perdas na rede básica (perdas regulatórias) e receita irrecuperáveis. (PRORET, 2019). como as transmissoras e outras distribuidoras.

E, a TUSD Encargos, engloba o conjunto de encargos a seguir:

1. Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – P&D_EE;
2. Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica – TFSEE;
3. Contribuição para o ONS;
4. Quota da Conta de Desenvolvimento Energético – CDE; e
5. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.

Baseado neste detalhamento da estrutura tarifária no Brasil, pode-se inferir que existem diversos outros fatores que impactam na remuneração sobre a energia, além da parcela que corresponde propriamente ao custo da energia elétrica consumida. Estes fatores possuem grande importância nas alternativas de mudanças propostas pela ANEEL para o modelo de compensação de energia a ser adotado num futuro próximo.

2.4. ALTERNATIVAS DE MUDANÇAS PROPOSTAS PELA ANEEL

A regulamentação sobre o sistema de compensação da energia elétrica se encontra na eminência de um marco legal devido ao Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018, publicado pela ANEEL no dia 6 de dezembro de 2012.

O relatório conclui que o modelo de compensação atual, referido como alternativa 0 no documento, é inviável de ser mantido indefinidamente, e, sugere cinco novas alternativas a serem adotadas, conforme a GD no Brasil atingir os patamares desejados, de forma a manter os objetivos visados com a regulamentação da GD, para incentivar a descentralização da geração de energia e diversificação da matriz elétrica do país, a fim de conferir ao Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) maior confiabilidade.

Seguem as descrições das alternativas sugeridas ao sistema de compensação brasileiro, assim como os componentes da tarifa a serem pagas pelos consumidores de acordo com estas alternativas, segundo o relatório em questão:

1. **Alternativa 0 –** Cenário atual: a compensação da energia injetada na rede se dá por todas as componentes da TUSD e da TE;

2. **Alternativa 1 –** Incide Fio B: a componente Transporte Fio B incidiria sobre toda a energia consumida da rede. As demais componentes tarifárias continuariam incidindo sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede.

3. **Alternativa 2 –** Incide Fio A e Fio B: as componentes referentes ao Transporte (Fio A e Fio B) incidiriam sobre toda a energia consumida da rede. As demais parcelas da tarifa continuariam incidindo sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede.

4. **Alternativa 3 –** Incide Fio A, Fio B e Encargos: equivalente à alternativa anterior, mas incluindo a parcela de Encargos da TUSD entre as componentes que seriam aplicáveis a todo o consumo de energia registrado na unidade.

5. **Alternativa 4 –** Incide toda a TUSD: com esta alternativa, as componentes da TE incidiriam sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede, de maneira que a TUSD continuaria incidindo sobre toda a energia consumida da rede.

6. **Alternativa 5 –** Incide toda a TUSD e os Encargos e demais componentes da TE: neste caso, apenas a componente de Energia da TE incidiria sobre a diferença entre a energia consumida e a energia injetada na rede. As demais componentes tarifárias incidiriam sobre toda a energia consumida da rede. (ANEEL, 2018).

A ideia inicial, publicada no próprio relatório, era que ocorresse uma atualização da resolução normativa ANEEL 482/2012, "com previsão de publicação de um novo regulamento com vigência a partir de 2020" (ANEEL, 2018). No entanto, devido às disputas econômicas e políticas, entre as concessionárias e consumidores, este processo ainda se encontra em trâmite no sistema legislativo brasileiro, que apesar da ANEEL ser uma "autarquia especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME)" (Presidência da República, 1997), interveio neste impasse, através do PL 5829/2019.

De acordo com o Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018, na modalidade referente à geração no próprio local de consumo, é possível manter a alternativa 0 em vigor, até que seja atingida a marca de potência instalada igual a 3,4 GW, quando seria adotada a alternativa 1, com previsão de mesmo com essa mudança, atingir 17 GW de potência instalada até 2035.

Em relação à modalidade de geração remota, onde a compensação dos créditos se dá em uma instalação diferente daquela que foi gerada a energia, o relatório sugere a troca para a alternativa 1, ao ser atingida uma potência instalada de 1,25 GW, previsto para ocorrer em 2022, pelas estimativas da própria ANEEL. Em sequência, ao ser atingida uma potência instalada de 2,13 GW nesta modalidade, é sugerida a adoção da alternativa 3.

Segundo a ANEEL, as alternativas participantes da transição proposta pelo relatório, alternativas 0, 1 e 3, e, as demais também presentes no documento, correspondem às seguintes taxas de compensação dos créditos de energia gerados, indicadas na tabela 2.

Tabela 4 - Taxas de compensação dos créditos de energia para cada alternativa sugerida

Alternativas	Taxa de compensação (%)
Alternativa 0	100
Alternativa 1	72
Alternativa 2	66
Alternativa 3	59
Alternativa 4	49
Alternativa 5	37

Fonte: ANEEL (2018)

3. METODOLOGIA

A reprodutibilidade e a falseabilidade são pilares do método científico. No presente capítulo serão descritas as metodologias utilizadas no estudo realizado neste projeto, além de também apresentar as justificativas para o sistema escolhido como base para o estudo supracitado, de modo a permitir a reprodução e refutação do mesmo.

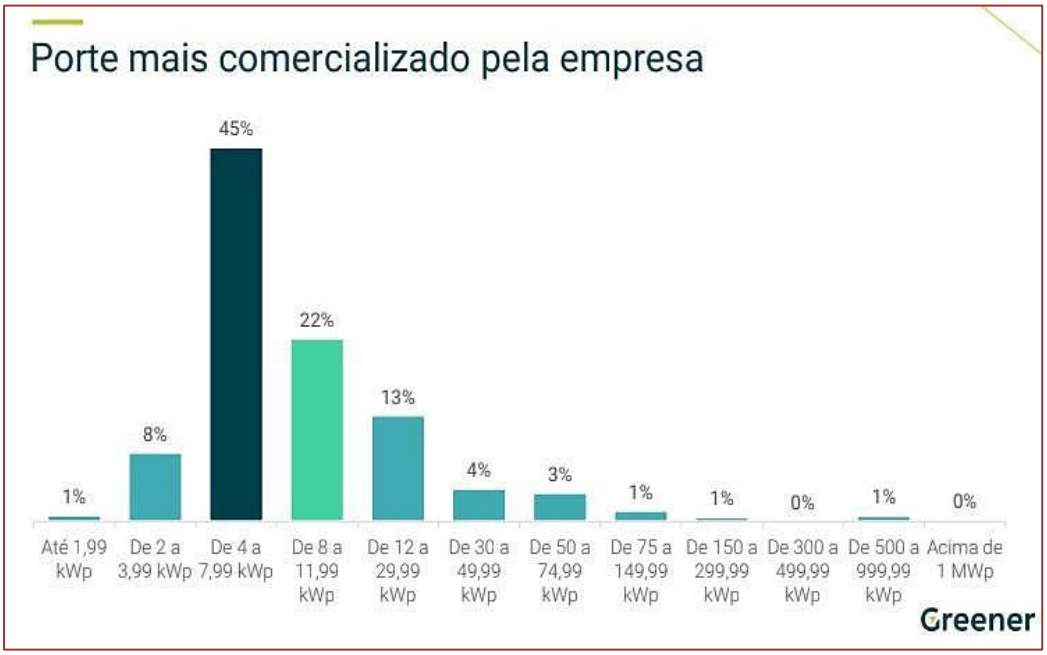
Com o objetivo de definir e descrever claramente o problema será realizada uma análise, com base em dados quantitativos, do sistema tarifário atual e os cenários futuros sugeridos pela ANEEL. A investigação e coleta de dados serão realizadas através da leitura de relatórios, resoluções, normas e artigos publicados. Documentos da ANEEL e distribuidoras de energia formarão a principal base de aquisição de dados. Também será realizada uma revisão bibliográfica sistemática visando identificar, avaliar e sintetizar dados disponíveis relevantes.

Após a coleta dos dados, ocorrerá a análise, validação estatística e selecioção da amostra, que deverá ser representativa o suficiente para apoiar conclusões futuras (MARCONI; LAKATOS, 2010). A amostra, de distribuidoras de energia, será submetida ao processo de descrição e comparação das estruturas de custos (fixos e variáveis). Serão utilizados os principais indicadores de engenharia econômica como o fluxo de caixa, payback descontado, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR).

3.1. ANÁLISE DA POTÊNCIA DE SFV MAIS COMUM NO BRASIL

Segundo a Greener (2021), empresa de pesquisa especializada em energia solar fotovoltaica, em uma de suas pesquisas de mercado mais recentes, que reuniu 1801 empresas, no período de 10 de junho a 12 de julho de 2021, o porte de sistema mais comercializado pelas empresas está na faixa de 4 a 7,99 kWp, sendo o porte mais vendido por 45% das empresas, conforme é mostrado na figura 8.

Figura 16 - Porte de SFV mais comercializado pelas empresas



Fonte: Greener (2021)

A faixa de potência mais comercializada mostra-se uma grande candidata a se tornar um bom parâmetro de referência, pois, além de representar quase metade dos sistemas comercializados, também engloba distintas classes de UCs, como residencial e comercial, tal como variadas modalidades, como autoconsumo remoto e geração própria, sendo esta última, a mais comum dentro do cenário brasileiro de GD (INOVACARE SOLAR, 2021).

3.2. DIMENSIONAMENTO DE UM SFV PARA CONSUMIDORES RESIDENCIAIS TÍPICOS

Baseado no porte de sistema predominante determinado no item anterior, foi dimensionado um SFV para um consumidor residencial típico, a fim de avaliar a viabilidade financeira de sua instalação, em diferentes regiões do país, cada qual com suas respectivas concessionárias e tarifas de energia, aplicando as alternativas de mudança sugeridas pela ANEEL no Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018.

O dimensionamento do sistema foi realizado a partir dos dados de faturas de energia da classe residencial. Foram usadas como base 2 faturas, para simular um SFV operando na modalidade de autoconsumo remoto, uma das modalidades de maior interesse ao aderir à GD, e também a que está sujeita a maior mudança na regulamentação, de acordo com as propostas de mudança da ANEEL. Através do consumo médio do último ano foi determinado qual sistema necessário para realizar a compensação.

3.2.1. RECURSO SOLAR DISPONÍVEL

Para o dimensionamento do SFV é necessário levantar os dados referentes ao recurso solar disponível no local a ser instalado o mesmo. Este dado foi obtido através do portal CRESESB, centro de pesquisa sobre recursos energéticos brasileiros. O conceito que representa a disponibilidade de recurso solar no dimensionamento é chamado de Horas de Sol Pleno (Hsp) e é uma importante ferramenta matemática que converte a irradiância solar disponível, que se apresenta através diversos valores ao longo do tempo, numa quantidade de horas equivalente ao se considerar o sol irradiando 1000 W/m^2 a todo momento, de forma a compatibilizar o fator temporal com os dados de placa dos módulos, informados em condições STC, isto é, operando com a irradiância referida. As horas de sol pleno são calculadas pela equação (1):

$$H_{sp} = \frac{H}{100} \quad (1)$$

onde,

Hsp são as horas de sol pleno disponíveis no local, em horas (h); H é a irradiação solar disponível no local, em watt-hora por metro quadrado (Wh/m^2).

3.2.2. EFICIÊNCIA TOTAL DO SFV

A taxa de desempenho é escolhida para modelar as perdas do SFV por temperatura, nos cabos tanto na parte em corrente contínua quanto na parte de corrente alternada, no inversor, sujeira sobre a superfície dos módulos e incompatibilidade elétrica. A tabela 3 mostra o impacto dos fatores listados acima na eficiência total do sistema.

Tabela 5 - Impacto das perdas na eficiência do SFV

Natureza	Faixa	Valor adotado
Perdas por Temperatura	7 a 18 %	12,5 %
Incompatibilidade Elétrica	1 a 2 %	1,5 %
Acúmulo de Sujeira	1 a 8 %	4 %
Cabeamento C.C.	0,5 a 1 %	1 %
Cabeamento C.A.	0,5 a 1 %	1 %
Inversor	2,5 a 5 %	5 %
Total	-	25,00%

Fonte: Photovoltaic Systems Engineering (2010) - Adaptado

Normalmente, a taxa de desempenho situa-se acerca de 80% de rendimento, mas para os dimensionamentos realizados, foi utilizado o fator de 75%, valor adequado a uma perspectiva mais conservadora quanto ao desempenho do SFV.

A partir da determinação do consumo médio, do recuso solar disponível e estimativa das perdas do SFV, utiliza-se a equação (2) para determinar o porte do sistema a ser instalado para realizar a compensação de energia desejada.

$$P_{GFV} = \frac{C}{30.PR.H_{SP}} \qquad (2)$$

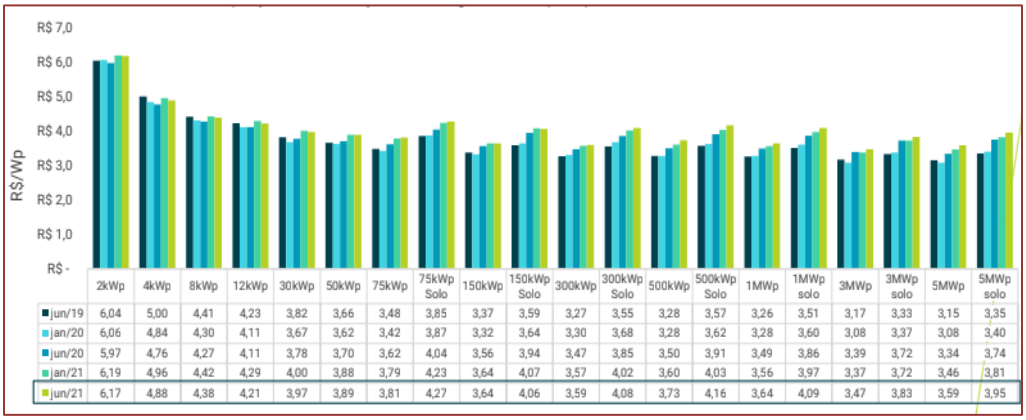
onde,

C é o consumo médio mensal a ser compensado, em quilowatt-hora (kWh); PR é a taxa de desempenho do sistema, em quilowatt por quilowatt-pico (kW/kWp); Hsp é a quantidade de horas de sol pleno no local, em horas (h); Pgfv é a potência STC total do gerador fotovoltaico, em quilowatt-pico (kWp).

3.2.3. DETERMINAÇÃO DO INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA INSTALAR O SFV DIMENSIONADO

O valor do investimento será estimado baseando-se nos dados disponibilizados no estudo realizado pela Greener, exibidos na figura 9, através da equação (3).

Figura 17 - Estudo Greener - Preços para o Cliente Final - Junho 2021



	2kWp	4kWp	8kWp	12kWp	30kWp	50kWp	75kWp	75kWp Solo	150kWp	150kWp Solo	300kWp	300kWp Solo	500kWp	500kWp Solo	1MWp	1MWp solo	3MWp	3MWp solo	5MWp	5MWp solo
jun/19	6,04	5,00	4,41	4,23	3,82	3,66	3,48	3,85	3,37	3,59	3,27	3,55	3,28	3,57	3,26	3,51	3,17	3,33	3,15	3,35
jan/20	6,06	4,84	4,30	4,11	3,67	3,62	3,42	3,87	3,32	3,64	3,30	3,68	3,28	3,62	3,28	3,60	3,08	3,37	3,08	3,40
jun/20	5,97	4,76	4,27	4,11	3,78	3,70	3,62	4,04	3,56	3,94	3,47	3,85	3,50	3,91	3,49	3,86	3,39	3,72	3,34	3,74
jan/21	6,19	4,96	4,42	4,29	4,00	3,88	3,79	4,23	3,64	4,07	3,57	4,02	3,60	4,03	3,56	3,97	3,37	3,72	3,46	3,81
jun/21	6,17	4,88	4,38	4,21	3,97	3,89	3,81	4,27	3,64	4,06	3,59	4,08	3,73	4,16	3,64	4,09	3,47	3,83	3,59	3,95

Fonte: Greener (2021)

$$I = P_{KWp}.P_{GFV} \qquad (3)$$

onde,

I é o valor do investimento, em reais (R$); P_{kWp} é o preço médio do kWp instalado, em reais por quilowatt-pico (R$/kWp); P_{GFV} é a potência do gerador fotovoltaico, em quilowatt-pico (kWp).

3.3. LEVANTAMENTO DAS TARIFAS DAS CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA

Para fidedignamente quantificar as entradas no fluxo de caixa do investimento relacionado a implantação do SFV e, principalmente, poder avaliar a viabilidade econômica do investimento após a aplicação das alternativas de mudança na regulamentação da GD sugeridas pela ANEEL, é necessário o conhecimento da estrutura tarifária de energia por concessionária.

A tabela 4 exibe as tarifas das concessionárias selecionadas para a realização deste estudo, baseadas em (ANEEL 2021).

Tabela 6 - Composição das faturas de energia por concessionária

Concessionária	Local	Tarifa Convencional (R$/kWh)	ICMS	PIS/COFINS*	Tarifa Final (R$/kWh)
ENEL	GO	0,54739	29,00%	4,59%	0,82421
CPFL Paulista	SP	0,59566	25,00%	4,59%	0,84594
COPEL	PR	0,55881	29,00%	4,59%	0,84140
LIGHT	RJ	0,69405	32,00%	4,59%	1,09447
ENERGISA	MT	0,6835	25,00%	4,59%	0,97069
NEO ENERGIA	DF	0,51478	25,00%	4,59%	0,73108
AMAZONAS ENERGIA	AM	0,69349	25,00%	4,59%	0,98488
CEMIG	MG	0,61805	30,00%	4,59%	0,94483
Celesc	SC	0,53224	25,00%	4,59%	0,75587
NEO ENERGIA	PE	0,61948	25,00%	4,59%	0,87977

Fonte: ANEEL (2021)

*Valor médio no ano de 2021, segundo dados da EDP.

Adicionalmente, ressalta-se que foi considerada a bandeira verde ao longo de todo o estudo realizado. Os locais de instalação do Sistema foram escolhidos baseados em três considerações:

1. Estudar as consequências para algumas das concessionárias de maior porte e importância dentro do cenário brasileiro;
2. Estudar as consequências para pelo menos uma concessionária por região do país, para se ter uma visão diversificada sobre o problema.

3.4. VIABILIDADE ECONÔMICA

Para avaliar a viabilidade econômica da implementação do SFV, foram utilizados os parâmetros financeiros apresentados neste subcapítulo, de acordo com as alternativas de mudanças propostas pela ANEEL.

Nos fluxos de caixa elaborados levou-se em consideração o Investimento Inicial realizado na instalação do SFV, assim como a Economia Gerada pelo SFV e os custos de operação e manutenção do SFV, estimados em 0,5% a.a do investimento inicial, ambos reajustados anualmente à taxa de degradação natural do gerador fotovoltaico, estimada em 0,7% a.a., para uma vida útil do SFV de 25 anos. Este valor de vida útil e taxa de degradação foram escolhidos baseado nas ofertas dos melhores fabricantes do mercado, que ainda garantem geração mínima dos módulos acima de 80% do nominal durante toda vida útil (Blue Sol, 2020). Os custos de operação e manutenção foram lançados como saídas de caixa ao final de cada ano. As Economias Geradas pelo SFV foram lançadas mensalmente no fluxo de caixa, de forma a representar o mais fielmente possível as entradas no fluxo de caixa, já que a Economia Gerada ocorre como forma de redução na fatura de energia mensal. Adicionalmente, também foi prevista a substituição do inversor, que possui normalmente garantia de 10 anos pelos fornecedores, se manifestando como uma saída de caixa no final do 12º ano, e estimada em 30% do investimento inicial realizado, conforme trabalho de Araújo et al. (2018).

Na tomada de decisão quanto ao investimento buscou-se considerar o "tripé" dos investimentos: a rentabilidade, a liquidez e a segurança do investimento.

3.4.1. TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE (TMA)

A taxa mínima de atratividade é um dos parâmetros utilizados para decidir se um investimento deve ou não ser realizado. Diz respeito ao rendimento mínimo esperado de um empreendimento de forma a justificar o risco aceito ao realizar qualquer tipo de investimento.

Uma referência amplamente utilizada na definição da TMA é a taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia), a taxa básica de juros brasileira. Através de sua 241ª reunião, o Comitê de Política Monetária (Copom) elevou a taxa SELIC para 6,25% a.a., no dia 22 de setembro de 2021 (BACEN, 2021).

Portanto, com base nesta atualização da taxa básica de juros brasileira, foi adotada uma TMA de 10% a.a. no estudo posteriormente apresentado, com a finalidade de utilizar uma margem de 60% acima da taxa SELIC para se defender de possível variação nos custos do projeto, assim como remunerar o risco do empreendimento.

3.4.2. VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O método utilizado para valoração do dinheiro no tempo foi o Valor Presente Líquido (VPL). Este consiste em um lançamento dos fluxos de caixa e seu transporte com a respectiva valoração no tempo, através da TMA definida no item anterior, para o instante inicial, de forma que, a decisão será favorável ao investimento caso cumprida a condição de que o VPL seja positivo. O VPL é o indicador da rentabilidade do investimento, então quanto mais positivo for o VPL, mais rentável é o investimento.

A equação (4) descreve o cálculo do VPL:

$$VPL = I_i + \frac{FC_1}{(1+TMA)^1} + \frac{FC_2}{(1+TMA)^2} + \cdots + \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} \qquad (4)$$

onde,

Ii é o investimento inicial;

FC é o fluxo de caixa em cada período;

n é o número de períodos.

3.4.3. TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

A taxa interna de retorno é a taxa que iguala o VPL igual a zero. Desta forma pode ser utilizada como parâmetro de decisão sobre a realização de um investimento, através de sua comparação com a TMA definida. Se a TIR for maior que a TMA existe ganho financeiro com o investimento. A TIR foi utilizada como complemento à análise do VPL, pois, muitas das vezes, acaba tendo uma maior aceitação entre investidores, já que esta retorna um valor percentual, enquanto o VPL retorna um valor absoluto.

3.4.4. *PAYBACK* DESCONTADO (PBD)

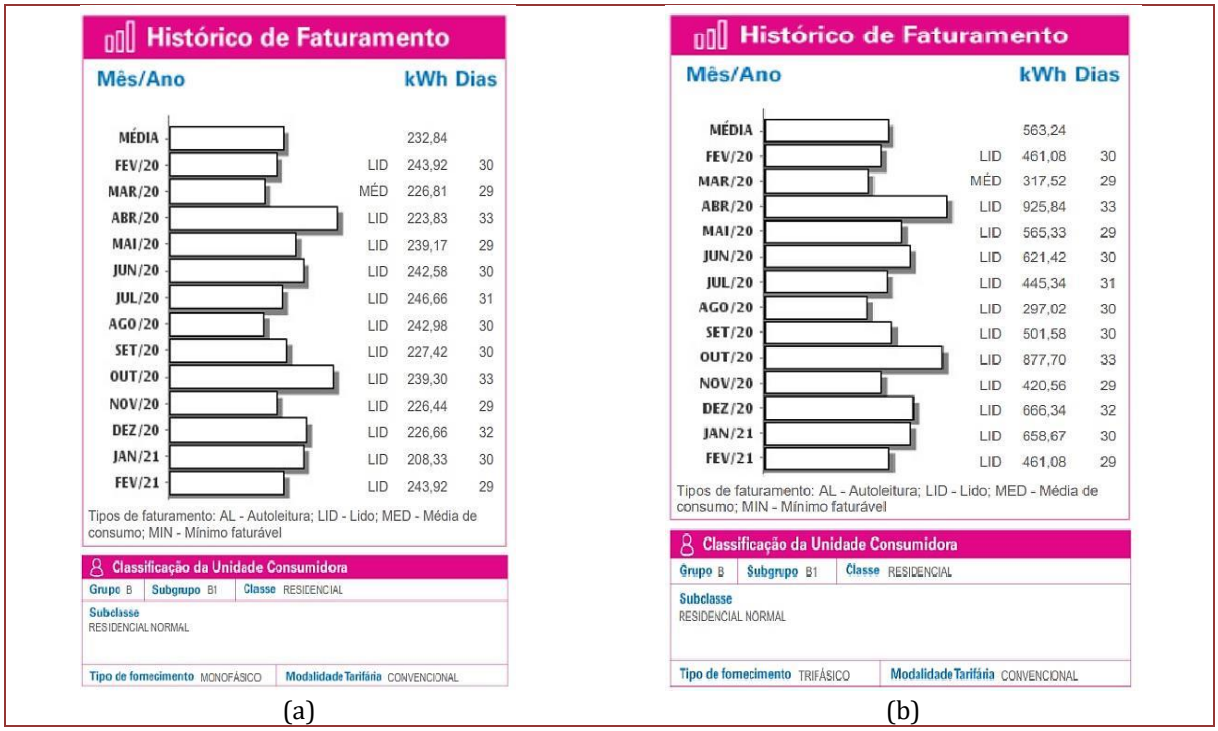
Por último, também foi levado em consideração o *payback* descontado, parâmetro que informa o tempo em que o valor inicial é recuperado, levando em consideração a valoração do dinheiro no tempo, através da TMA. Assim como a TIR, o *payback* descontado se mostra muito útil quando se tem múltiplas possibilidades de investimento, o que facilita tecer conclusões sobre o interesse no investimento em GD, após as possíveis mudanças na regulamentação, ao permitir a comparação com outros tipos de investimentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DIMENSIONAMENTO DO SFV DE ACORDO COM O RECURSO SOLAR DISPONÍVEL

O dimensionamento foi realizado para compensar o consumo das UCs cujas características são exibidas na figura 10, ambas pertencentes à classe Residencial e modalidade tarifária convencional.

Figura 18 - Fatura de energia de residência com fornecimento monofásico (a) e trifásico (b)



(a) (b)

Fonte: Próprio Autor (2021)

O consumo utilizado para o dimensionamento foi determinado através do cálculo da média de consumo dos 13 últimos meses, e, então, subtraídos desta média, os respectivos custos de disponibilidade das UCs (Tabela 1), resultando em uma necessidade de geração de 666,08 kWh/mês.

A tabela 5 exibe o recurso solar disponível para cada local onde foi estudada a implantação do SFV, valores de irradiação no plano horizontal obtidos no portal CRESESB, assim como, a potência necessária do SFV para a geração supracitada, calculada utilizando as equações (1) e (2), e, o respectivo investimento necessário, estimado pela equação (3).

Tabela 7 - Recurso Solar disponível e dados do SFV necessário

Local	Irradiação média diária (kWh/m^2)	Potência (kWp)	Preço (R$)
Goiânia - GO	5,26	5,63	R$ 27.465,03
São Paulo - SP	4,45	6,65	R$ 32.464,29
Curitiba - PR	4,20	7,05	R$ 34.396,68
Rio de Janeiro - RJ	4,73	6,26	R$ 30.542,51
Cuiabá - MT	5,11	5,79	R$ 28.271,25
Brasília - DF	5,26	5,63	R$ 27.465,03
Manaus - AM	4,42	6,70	R$ 32.684,63
Belo Horizonte - MG	5,17	5,73	R$ 27.943,15
Florianópolis - SC	4,25	6,97	R$ 33.992,02
Recife - PE	5,34	5,54	R$ 27.053,57

Fonte: Próprio Autor (2021)

4.2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ANÁLISE FINANCEIRA

Aplicando as alternativas de mudança sugeridas pela ANEEL, através das porcentagens médias presentes na tabela 2, nos fluxos de caixa elaborados, obteve-se os resultados exibidos nas tabelas 6, 7, 8, 9, 10. Os resultados mostram a quase inviabilidade do projeto de SFV a partir da Alternativa 4. `Por isto a alternativa 5 não será mostrada aqui, pois é totalmente inviável.

Tabela 8 - Resultados pós aplicação da Alternativa 0 na análise realizada sobre empreendimento

Alternativa 0				
Local	Concessionária	VPL (TMA = 10%)	TIR	*PB*d (TMA = 10%)
Goiânia - GO	ENEL	R$ 27.955,67	24,75%	5 anos e 7 meses
São Paulo - SP	CPFL Paulista	R$ 23.804,39	20,66%	6 anos e 10 meses
Curitiba - PR	COPEL	R$ 21.268,13	19,01%	7 anos e 7 meses
Rio de Janeiro - RJ	LIGHT	R$ 43.901,58	30,87%	4 anos e 5 meses
Cuiabá - MT	ENERGISA	R$ 37.549,48	29,28%	4 anos e 8 meses
Brasília - DF	NEO ENERGIA	R$ 21.248,16	21,23%	6 anos e 8 meses
Manaus - AM	AMAZONAS ENERGIA	R$ 33.558,72	24,87%	5 anos e 7 meses
Belo Horizonte - MG	CEMIG	R$ 36.096,13	28,73%	4 anos e 9 meses
Florianópolis - SC	Celesc	R$ 15.570,77	16,71%	8 anos e 10 meses
Recife - PE	NEO ENERGIA	R$ 32.427,61	27,37%	5 anos e 1 meses

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 9 - Resultados pós aplicação da Alternativa 1 na análise realizada sobre empreendimento

Alternativa 1				
Local	Concessionária	VPL (TMA = 10%)	TIR	*PB*d (TMA = 10%)
Goiânia - GO	ENEL	R$ 11.334,75	16,06%	9 anos e 3 meses
São Paulo - SP	CPFL Paulista	R$ 6.745,24	13,09%	14 anos e 7 meses
Curitiba - PR	COPEL	R$ 4.300,45	11,87%	17 anos e 2 meses
Rio de Janeiro - RJ	LIGHT	R$ 21.830,51	20,39%	7 anos e 0 meses
Cuiabá - MT	ENERGISA	R$ 17.990,32	19,28%	7 anos e 5 meses
Brasília – DF	NEO ENERGIA	R$ 6.505,35	13,51%	11 anos e 6 meses
Manaus - AM	AMAZONAS ENERGIA	R$ 13.697,82	16,15%	9 anos e 2 meses
Belo Horizonte - MG	CEMIG	R$ 17.042,81	18,89%	7 anos e 7 meses
Florianópolis - SC	Celesc	R$ 327,91	10,15%	24 anos e 1 meses
Recife - PE	NEO ENERGIA	R$ 14.686,28	17,93%	8 anos e 1 meses

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 10 - Resultados pós aplicação da Alternativa 2 na análise realizada sobre empreendimento

Alternativa 2				
Local	Concessionária	VPL (TMA = 10%)	TIR	*PB*d (TMA = 10%)
Goiânia - GO	ENEL	R$ 7.773,13	14,19%	10 anos e 10 meses
São Paulo - SP	CPFL Paulista	R$ 3.089,71	11,43%	18 anos e 5 meses
Curitiba - PR	COPEL	R$ 664,52	10,29%	23 anos e 2 meses
Rio de Janeiro - RJ	LIGHT	R$ 17.100,99	18,17%	7 anos e 11 meses
Cuiabá - MT	ENERGISA	R$ 13.799,07	17,15%	8 anos e 6 meses
Brasília - DF	NEO ENERGIA	R$ 3.346,17	11,82%	17 anos e 4 meses
Manaus - AM	AMAZONAS ENERGIA	R$ 9.441,91	14,27%	10 anos e 9 meses
Belo Horizonte - MG	CEMIG	R$ 12.959,95	16,80%	8 anos e 9 meses
Florianópolis - SC	Celesc	-R$ 2.938,42	8,68%	-
Recife - PE	NEO ENERGIA	R$ 10.884,57	15,91%	9 anos e 4 meses

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 11 - Resultados pós aplicação da Alternativa 3 na análise realizada sobre empreendimento

Alternativa 3				
Local	Concessionária	VPL (TMA = 10%)	TIR	*PB*d (TMA = 10%)
Goiânia - GO	ENEL	R$ 3.617,90	11,97%	16 anos e 11 meses
São Paulo - SP	CPFL Paulista	-R$ 1.175,07	9,45%	-
Curitiba - PR	COPEL	-R$ 3.577,40	8,40%	-
Rio de Janeiro - RJ	LIGHT	R$ 11.583,22	15,58%	9 anos e 7 meses
Cuiabá - MT	ENERGISA	R$ 8.909,28	14,66%	10 anos e 4 meses
Brasília - DF	NEO ENERGIA	-R$ 339,53	9,81%	-
Manaus - AM	AMAZONAS ENERGIA	R$ 4.476,68	12,05%	16 anos e 9 meses
Belo Horizonte - MG	CEMIG	R$ 8.196,62	14,34%	10 anos e 8 meses
Florianópolis - SC	Celesc	-R$ 6.749,13	6,91%	-
Recife - PE	NEO ENERGIA	R$ 6.449,24	13,54%	11 anos e 6 meses

Fonte: Próprio Autor (2021)

Tabela 12 - Resultados pós aplicação da Alternativa 4 na análise realizada sobre empreendimento

Alternativa 4				
Local	Concessionária	VPL (TMA = 10%)	TIR	*PB*d (TMA = 10%)
Goiânia - GO	ENEL	-R$ 2.318,15	8,71%	-
São Paulo - SP	CPFL Paulista	-R$ 7.267,63	6,50%	-
Curitiba - PR	COPEL	-R$ 9.637,29	5,57%	-
Rio de Janeiro - RJ	LIGHT	R$ 3.700,69	11,81%	17 anos e 4 meses
Cuiabá - MT	ENERGISA	R$ 1.923,86	11,02%	19 anos e 9 meses
Brasília - DF	NEO ENERGIA	-R$ 5.604,83	6,82%	-
Manaus - AM	AMAZONAS ENERGIA	-R$ 2.616,50	8,77%	-
Belo Horizonte - MG	CEMIG	R$ 1.391,86	10,75%	20 anos e 11 meses
Florianópolis - SC	Celesc	-R$ 12.193,01	4,23%	-
Recife - PE	NEO ENERGIA	R$ 113,05	10,06%	24 anos e 7 meses

Fonte: Próprio Autor (2021)

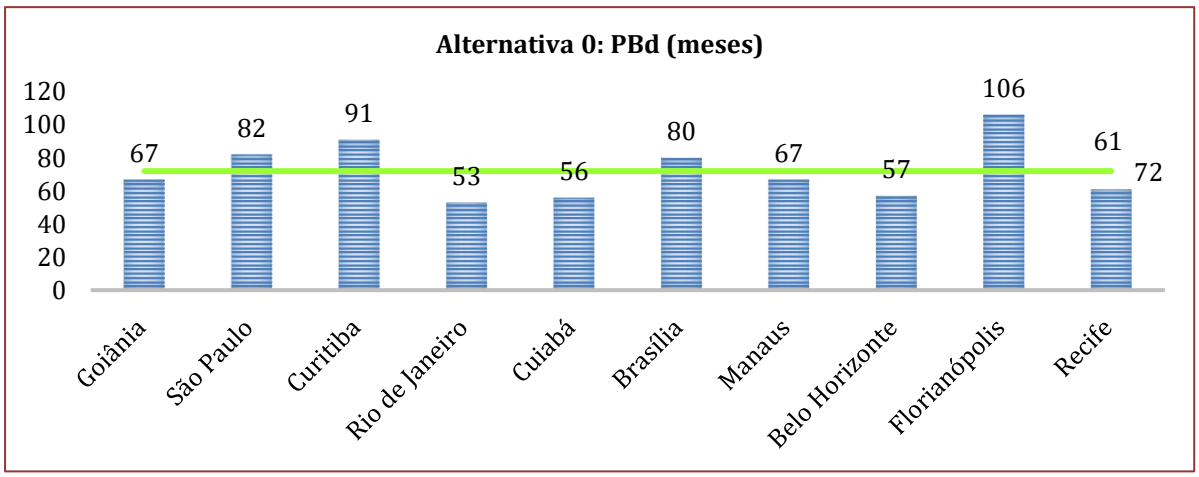
Os *Paybacks* descontados que aparecem representados pelo símbolo (-) indicam que não existe *payback* descontado para este investimento, para uma TMA de 10% ao ano.

4.3. ANÁLISES

4.3.1. CENÁRIO ATUAL (ALTERNATIVA 0)

O gráfico 3 traz os *paybacks* descontados com os quais opera a implantação dos SFVs em cada região estudada, tal como o *payback* descontado médio dentre as regiões no cenário atual, que será utilizado nas comparações com algumas das próximas alternativas.

Gráfico 1 - *Paybacks* descontados na alternativa 0 (cenário atual)



Fonte: Próprio Autor (2021)

Quanto à implantação do SFV no cenário atual, o parecer é positivo visto que todos os empreendimentos trazem lucro ao investidor, independentemente do local onde o SFV é instalado. Este resultado já era esperado baseado no momento vivido, no qual presencia-se o crescimento intenso da GD no país, onde os SFVs compõem a maior parte desse tipo de geração de energia.

4.3.2. MUDANÇAS PROPOSTAS PELA ANEEL (ALTERNATIVAS 1 E 2)

O estudo foca a categoria cuja potência dos sistemas é a mais instalada pelo mercado, então pode-se inferir que a invibialização causada pela alternativa 5, na diversa quantidade de locais estudados, poderia afetar fortemente o mercado do segmento.

A instalação do SFV é viável em 90% dos locais estudados, quando aplicada a alternativa 2, conforme exibido pelo gráfico 4, sendo inviável apenas em Florianópolis-SC, devido principalmente à baixa irradiação solar média disponível, sendo a segunda menor dentre os locais escolhidos, em conjunto com o baixo valor da tarifa bruta cobrada pela concessionária Celesc, também a penúltima entre as tarifas dos locais escolhidos.

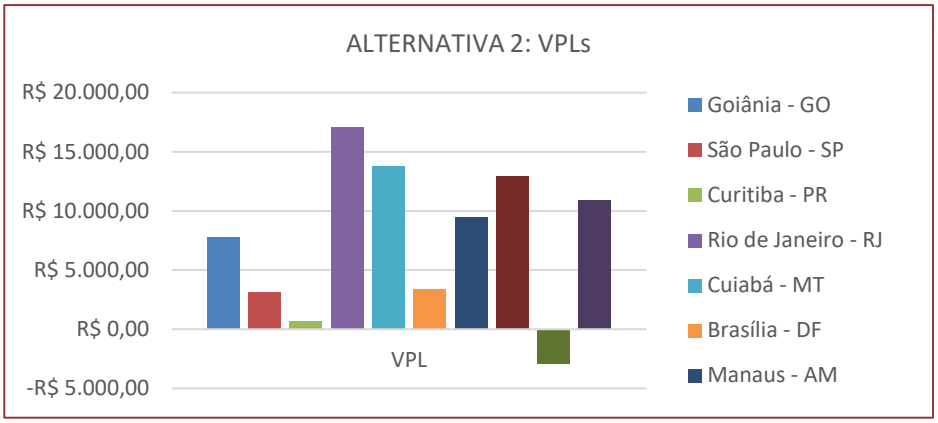
Entretanto, apesar do VPL positivo para os SFVs instalados nos demais locais, o *PBd* para a TMA sofreu um aumento médio de aproximadamente 124,76 % em relação ao *PB*d do investimento, quando realizado antes da adoção das mudanças propostas (Alternativa 0), podendo ser visualizada esta diferença de patamar no gráfico 5.

O gráfico 6 exibe uma comparação entre os *PB*ds da alternativa 1 e do cenário atual, sob a qual recai a análise a seguir.

A alternativa 1 é aquela sobre a qual recai o maior interesse. De acordo com o Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018 esta alternativa integraria um período de vigência na geração remota e na geração local. Além disso, no PL 5829, que também ficou conhecido como Marco Legal da GD, aprovado na Câmara dos Deputados em 18 de agosto de 2021, e que atualmente se encontra no Senado, consta a mudança para esta alternativa, onde a GD passa a remunerar os custos do serviço de distribuição de

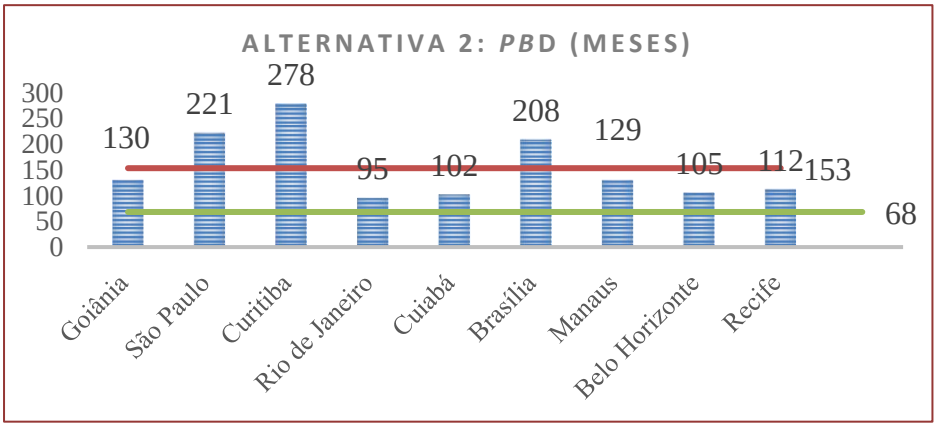
energia, inicialmente passando por um período de transição com remuneração parcial destes custos e a diferença sendo custeada pela CDE.

Gráfico 2 - VPLs na alternativa 2 para cada região do estudo



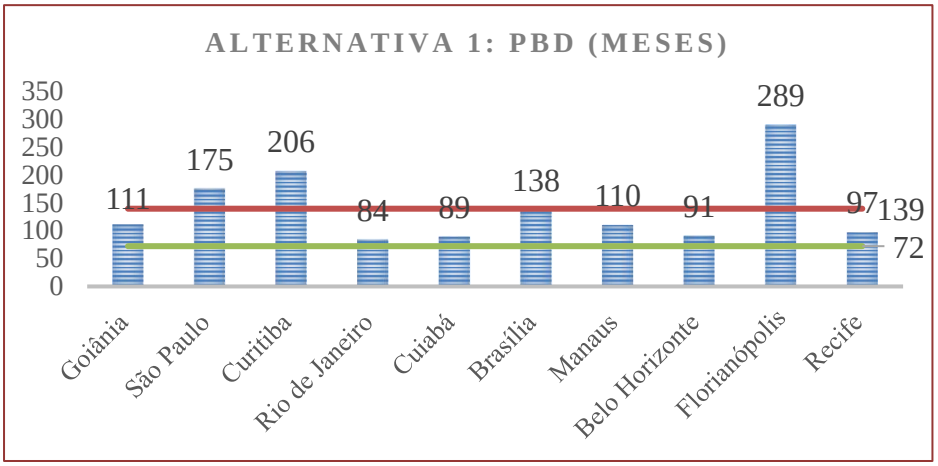
Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 3 - *Payback* descontado da alternativa 2 por região



Fonte: Próprio Autor (2021)

Gráfico 4 - *Payback* descontado da alternativa 1 por região



Fonte: Próprio Autor (2021)

5. CONCLUSÕES

O Brasil vive uma crise energética gravíssima, a pior desde a crise energética de 2001, onde houve até mesmo necessidade de racionamento de energia, devido aos baixos índices pluviométricos nos reservatórios, o que acarretou na criação de uma nova bandeira tarifária, a bandeira escassez hídrica. Nunca foi tão necessária a diversificação da matriz elétrica através de novas fontes de energia, tanto no âmbito da falta de energia disponível quanto para garantir a segurança e confiabilidade do SEB.

Em paralelo a esta situação difícil ocorre o crescimento exponencial da GD no país. No entanto, esta modalidade ainda não atingiu o patamar necessário para complementar a geração centralizada, realizada em sua maior parte pelas hidroelétricas de grande porte, para conceder as qualidades supracitadas ao SEB. Adicionalmente, a GD encontra-se no meio de uma feroz disputa entre as concessionárias e os consumidores que possuem GD instalada sobre componentes da tarifa não pagas, o que levou a ANEEL a propor cinco novas alternativas para o SCEE, algumas das quais adotadas e complementadas pelo PL 5829/2019, buscando um novo cenário, onde as concessionárias fossem propriamente remuneradas e não impactasse na expansão da GD no país.

Diante de tais mudanças é necessário avaliar o impacto das novas alternativas propostas ao SCEE no crescimento da GD. Para isto, o presente trabalho analisou os impactos das novas alternativas sobre SFVs em diferentes regiões do país, já que a ESF é responsável por mais de 97% da potência instalada em GD no Brasil.

O estudo realizado baseou-se em duas variáveis que representam os aspectos naturais e monetários que impactam no retorno do investimento, sendo elas o recurso solar disponível e os valores das tarifas cobradas pelas concessionárias de energia, para as diferentes regiões analisadas.

As alternativas 3 e 4 não se comportaram de maneira atraente aos investimentos no setor, apresentando viabilidade do investimento apenas para 40 e 60 %, respectivamente, dos locais analisados. Isto pode acarretar em um prejuízo para o desenvolvimento da GD no país, caso fosse seguida a orientação do Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018, onde teria-se a alternativa 3 como alternativa final aplicada sobre a geração remota. Além disso, a instalação dos SFVs mostrou-se que extremamente sensível à adoção das alternativas 1 e 2. Apesar destas alternativas passarem no teste da rentabilidade para todas as regiões caso adotada a alternativa 1 e em 90 % dos locais estudados para a alternativa 2, a principal referência para esta conclusão foi o aumento considerável nos *PB*d respectivamente de 93,06 e 124,06 %, podendo causar migração dos investidores para outros segmentos, devido à brusca queda de liquidez do investimento, o que prejudicaria a expansão da GD no Brasil, e assim como ressaltado para a alternativa 3, como a alternativa 1 seria a alternativa final para geração local de acordo com o Relatório de Análise de Impacto Regulatório 0004/2018, esta poderia colocar em risco os benefícios trazidos pela GD almejados para o SEB. Entretanto, é importante ressaltar que é possível este cenário ser alterado no futuro, caso mantidas as constantes elevações nos valores das tarifas praticadas pelas concessionárias de energia, o que ainda é incerto, pois a cobrança do fio-B sobre consumidores com GD pode diminuir a tarifa no geral, e devido à provável segurança traga pela aprovação de legislação própria à GD, além da custeação parcial da transição entre as alternativas, também prevista pelo PL 5829/2019.

REFERÊNCIAS

[1] ABSolar. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no Mundo. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> Acesso em: 11 out 2021.

[2] ANEEL. Caderno Temático ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída, Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2ª Edição. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161 > Acesso em: 11 out 2021.

[3] ANEEL. Geração Distribuída. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida> Acesso em: 11 out 2021.

[4] ANEEL. PRORET. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> Acesso em: 11 out 2021.

[5] ANEEL. Ranking das Tarifas. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas> Acesso em: 11 out 2021.

[6] ANEEL. Relatório de Análise de Impacto Regulatório Nº 0004/2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/18485189/6+Modelo+de+AIR+-+SRD+-+Gera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida.pdf/769daa1c-51af-65e8-e4cf-24eba4f965c1> Acesso em: 11 out 2021.

[7] ANEEL. Resolução Normativa Nº 482/2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em: 11 out 2021.

[8] ANEEL. Resolução Normativa Nº 687/2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> Acesso em: 11 out 2021.

[9] ARAÚJO et al. Estudo de Financiamento de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede no Norte do Brasil para Pessoa Jurídica. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado: 2018.

[10] Câmara dos Deputados. REDAÇÃO FINAL PROJETO DE LEI No 5.829-A DE 2019. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2062760&filename=REDACAO+FINAL+-+PL+5829/2019> Acesso em: 11 out 2021.

[11] CRESESB. Potencial Energético Solar. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata> Acesso em: 11 out 2021.

[12] CSE Solar Energy. Conexões em Geração Distribuída – Brasil – Dados GD ANEEL Atualizados. Disponível em: < https://www.csesolarenergy.com.br/conexoes-geracao-distribuida-aneel-atualizadas.html> Acesso em: 11 out 2021.

[13] Diário Popular. Estudo analisa aumento do consumo residencial de energia durante a pandemia. Disponível em: < https://www.diariopopular.com.br/geral/estudo-analisa-aumento-do-consumo-residencial-de-energia-durante-a-pandemia-159850/> Acesso em: 11 out 2021.

[14] EDP. Tabela de Cálculo PIS/PASP COFINS. Disponível em: <https://www.edp.com.br/distribuicao-sp/saiba-mais/informativos/tabela-de-calculo-pispasep-cofins> Acesso em: 11 out 2021.

[15] epe. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> Acesso em: 11 out 2021.

[16] ePowerBay. Geração Distribuída: Conceitos e História do Mercado. Disponível em: <https://www.epowerbay.com/single-post/geracao-distribuida-conceitos-e-historia-do-mercado> Acesso em: 11 out 2021.

[17] FERNANDES CAMILO SIMONE, L. Inserção da Micro e Minigeração Distribuída Fotovoltaica: Impactos na Receita das Distribuidoras e nas Tarifas dos Consumidores . Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 148, 2019.

[18] Focus. O que é geração distribuída: Descubra suas vantagens. Disponível em: <https://www.focusenergia.com.br/o-que-e-geracao-distribuida-descubra-suas-vantagens/> Acesso em: 11 out 2021.

[19] Greener. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 1° Semestre de 2021. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1-semestre-de-2021/> Acesso em: 11 out 2021.

[20] INOVACARE SOLAR. Você sabe quais são as modalidades de geração distribuída? Disponível em: < https://inovacare.solar/o-setor-fotovoltaico/voce-sabe-quais-sao-as-modalidades-de-geracao-distribuida/114> Acesso em: 11 out 2021.

[21] LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de Metodologia Científica. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

[22] Presidência da República. Decreto Nº 2.335, de 6 de Outubro de 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2335.HTM> Acesso em 11 out 2021.

[23] Solar Fonte. On-grid x Off-grid. Disponível em: <http://solarfonte.com.br/blog/grid-x-grid> Acesso em: 11 out 2021.

[24] Tax Group. Tabela ICMS 2021. Disponível em: <https://www.taxgroup.com.br/intelligence/tabela-icms-2021-atualizada/> Acesso em: 11 out 2021.

[25] Una-SUS. Organização Mundial de Saúde declara pandemia do novo Coronavírus. Disponível em: <https://www.unasus.gov.br/noticia/organizacao-mundial-de-saude-declara-pandemia-de-coronavirus> Acesso em: 11 out 2021.

[26] VEPO. A real diferença entre On e Off Grid. Disponível em: < http://vepoengenharia.com/2020/08/19/a-real-diferenca-entre-on-e-off-grid/> Acesso em: 11 out 2021.

Capítulo 12

Análise comparativa das soluções analíticas e numéricas para a concentração de urânio-235 de um reator nuclear PWR

Graziele Daiana Sena de Sousa
Lenilson Moreira Araújo

Resumo: Este trabalho tem como objetivo a comparação entre a solução analítica e a solução numérica da equação diferencial que modela a concentração do urânio-235 em reatores nucleares a água pressurizada (PWR). O estudo realizado tomou como base o trabalho de dissertação de mestrado "Análise Neutrônica de Reatores Térmicos com Recarga Considerando a Detecção de Antineutrinos", (Araújo, 2011). Os métodos numéricos aplicados foram métodos de Euler explícito e implícito, método Trapezoidal e métodos de Runge-Kutta de terceira e quarta ordem. Esses métodos foram implementados em linguagem de programação de alto nível FORTRAN. Os resultados obtidos demonstraram que o método de Euler implícito é o mais adequado dentre os demais para o tratamento da equação diferencial para a depleção do urânio-235, com os menores valores para os erros relativos.

Palavras-chave: Reatores Nucleares a Água Pressurizada, Métodos Numéricos, FORTRAN, Depleção do Urânio-235.

1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear mostra-se como uma solução viável e ainda em crescimento para a área energética, bem como para a área da saúde. Sendo uma ferramenta importante em tratamentos e diagnósticos realizados por meio dos radio fármacos, na indústria, nos processos de pesquisa e meio ambiente. No entanto, o grande problema está na confiança inerente a sua utilização. Os riscos associados à exposição, vazamentos radioativos ou superaquecimento de reatores nucleares geram a necessidade de prever o desempenho destes e ainda avaliar constantemente a segurança desses reatores.

O controle das concentrações dos nuclídeos (elementos) envolvidos nos processos de funcionamento de instalações nucleares é fundamental para garantir a geração de energia e radioisótopos de forma segura e otimizada. Para esse fim, utiliza-se modelos matemáticos para descrever as diversas reações que ocorrem no interior dessas instalações. A forma mais simples de representar essas reações é dada através de sistemas lineares de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) de primeira ordem e com coeficientes constantes. Apesar de ser possível determinar a solução analítica em problemas de decaimento radioativo, as soluções numéricas, com maior facilidade, são passíveis de modificações nos dados e na modelagem do problema, além disso, para grandes cadeias de nuclídeos, a resolução analítica torna-se inviável (Loch, 2016).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a comparação entre a solução analítica e as soluções numéricas para a concentração do Urânio-235, através da implementação de diversos métodos numéricos em linguagem de programação de alto nível FORTRAN.

Este trabalho possui a seguinte estrutura: a Seção 2 contém o referencial teórico. Na Seção 3 é apresentada a metodologia. A Seção 4 traz os resultados e discussões. Por fim, a Seção 5 é dedicada às conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. EQUAÇÃO DA DIFUSÃO DE NÊUTRONS

Uma usina nuclear tem como objetivo a produção de energia elétrica a uma taxa específica, existindo diferentes tipos de reatores nucleares, entre eles, os mais comuns são os reatores a água pressurizada (PWR, do inglês *Pressurized Water Reactor*) (Galvão, 2017). Em reatores de potência, existe um balanço, para um dado nível unidade de energia, entre o número de nêutrons que são produzidos por fissão e o número de nêutrons perdidos por espalhamento ou fuga, e a equação de derivadas parciais que descreve essa variação é chamada equação de difusão de nêutrons. A distribuição desses nêutrons é fator determinante da taxa em que as reações nucleares variam no interior do reator, sendo este o principal problema no estudo de reatores (Roza, 2013). A equação da difusão de nêutrons a dois grupos de energia, para qualquer geometria, pode ser escrita como:

$$\begin{cases} -D_1(r)\nabla^2\phi_1(r) + \Sigma_{r1}(r)\phi_1(r) = \frac{\chi}{k_{eff}}\left[\nu\Sigma_{f1}(r)\phi_1(r) + \nu\Sigma_{f2}(r)\phi_2(r)\right] \\ -D_2(r)\nabla^2\phi_2(r) + \Sigma_{r2}(r)\phi_2(r) = \Sigma_{s,1\to2}(r)\phi_1(r) \end{cases} \quad (1)$$

$$\forall r = (x, y, z) \in \Omega \subset R^3$$

Onde todos os termos são definidos de forma usual como em (Araújo, 2011). Ressalta-se que as considerações físicas e matemáticas utilizadas para solucionar a Eq.(1) nesse trabalho, são as mesmas utilizadas em (Araújo, 2011).

2.2. EQUAÇÃO DE DEPLEÇÃO NUCLEAR DO URÂNIO 235

As equações de depleção descrevem a taxa de mudança na concentração isotópica de cada nuclídeo no núcleo do reator, sendo de extrema importância para o controle efetivo do reator, já que a influência das concentrações em parâmetros considerados essenciais pode levar a um estado supercrítico ou subcrítico do reator (Prata, 2016). Usando algumas aproximações (Araújo, 2011), é possível escrever essas equações como um sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem. Neste trabalho, a EDO considerada tem a forma:

$$\frac{dn^{25}}{dt} = -(\sigma_{a1}^{25}\phi_1 + \sigma_{a2}^{25}\phi_2)n^{25} \quad (2)$$

Sendo n^{25} o número de núcleo de U-235 por cm^3, σ_{a1}^{25} e σ_{a2}^{25} as seções de choque microscópica de absorção do U-235 em cm^2, para o grupo 1 e 2, respectivamente, ϕ_1 e ϕ_2, os fluxos neutrônicos que são soluções da Eq.(1).

3. METODOLOGIA

A solução analítica da equação de depleção do Urânio-235, assim como os valores das seções de choque microscópica de absorção e os fluxos neutrônicos a dois grupos de energia para o reator teórico do tipo PWR para cada passo de tempo, foram obtidos da dissertação de mestrado "Análise Neutrônica de Reatores Térmicos com Recarga Considerando a Detecção de Antineutrinos" (Araújo, 2011). A linguagem de programação utilizada para a implementação dos métodos numéricos foi FORTRAN 90.

As operações implementadas para a resolução da Eq. (2) correspondem aos métodos numéricos de Euler Implícito, Euler Explícito, método trapezoidal e Runge-Kutta de terceira e quarta ordens, apresentados nas seções 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

3.1. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste trabalho, o problema proposto envolve um problema de valor inicial de primeira ordem obtido através da observação da depleção do Urânio-235, a dois grupos de energia. Esse PVI é descrito pela Eq.(2). Os valores para as seções de choque (σ_{a1}^{25} e σ_{a2}^{25}) e fluxos (ϕ_1 e ϕ_2) foram obtidos a partir do programa desenvolvido na dissertação (Araújo, 2011).

Inicialmente, é necessário discretizar a região onde procura-se a solução, devido a necessidade do computador de calcular a solução aproximada em determinados pontos e estes pontos são selecionados a partir do processo de discretização do domínio que a princípio é contínuo, e passa a ser discreto (Brandi & Carreira, 2016).

Define-se uma malha unidimensional, dividindo o intervalo de tempo [a, b] em N subintervalos de espaçamento h, dado pela Eq. (3).

$$h = \frac{b-a}{N} \quad (3)$$

O intervalo [a, b] considerado foi de 0 a 6, correspondendo aos meses de funcionamento do reator teórico do tipo PWR considerado na dissertação. Para o desenvolvimento que segue, da Eq.(2) vamos considerar que:

$$x = t; \quad (4.1)$$
$$y = y(x) = n^{25}(t); \quad (4.2)$$
$$\lambda = \lambda(x) = \sigma_{a1}^{25}\phi_1(t) + \sigma_{a2}^{25}\phi_2(t). \quad (4.3)$$

O que nos permite expressar o problema descrito pela Eq.(2) da seguinte forma:

$$\frac{dy}{dt} = f(x, y) \quad (5.1)$$

Onde:

$$f(x, y) = -\lambda y \quad (5.2)$$

3.2. MÉTODO DE EULER

3.2.1. MÉTODO DE EULER EXPLÍCITO

Sendo um dos mais simples métodos numéricos, também conhecido como método da reta secante, o método de Euler é um algoritmo de primeira ordem que considera um problema de Cauchy, ou problema de valor inicial (PVI) e estima uma solução numérica a partir da noção de derivada básica (Heath, 2002).

O método de Euler também é chamado de Euler explícito. Métodos explícitos calculam o estado do sistema em um tempo posterior ao estado atual.

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h \qquad (6)$$

De modo geral, pode-se escrever o método de Euler explícito, para y_0 constante, como:

$$y_{i+1} = y_0(1 + f(x_i, y_i)h)^i \, , i \geq 0 \qquad (7)$$

3.2.2. MÉTODO DE EULER IMPLÍCITO

Os métodos implícitos utilizam uma equação que envolve o estado atual e o posterior do sistema para encontrar uma solução. O método de Euler Implícito trata-se de uma variante do método de Euler Explícito e pode ser dado como:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_{i+1}, y_{i+1})h \qquad (8)$$

Ou rearranjando,

$$y_i = \frac{y_{i-1}}{(1 - f(x_{i+1}, y_{i+1})h)} \qquad (9)$$

3.3. MÉTODO TRAPEZOIDAL

Outro método implícito é o método trapezoidal ou método de Crank-Nicolson, o qual é obtido pela média dos métodos de Euler explícito e implícito (Quarteroni, Sacco & Saleri, 2000), dado pela Eq. (10):

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2}\left(f(x_{i+1}, y_{i+1})\right) \qquad (10)$$

3.4. MÉTODOS DE RUNGE-KUTTA

Os métodos de Runge-Kutta utilizam a aproximação em série de Taylor para obter formulações de alta ordem, eliminando o cálculo das derivadas de alta ordem e realizando avaliações da função a cada passo (Quarteroni, Sacco & Saleri, 2000). Esse método não requer o cálculo de qualquer derivada da função, mas depende de uma função k, que é definida avaliando a função f em diferentes pontos. De modo geral, os métodos são dados por:

$$y_{i+1} = y_i + hk[f(x_i, y_i)] \, , \; \forall k = 0{,}1, \ldots \qquad (11)$$

O número de pontos usados em um subintervalo indica a ordem do método. Desse modo, o método de Runge-Kutta de terceira é dado por:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 4k_2 + k_3) \qquad (12)$$

Onde,

$$k_1 = f(x_i, y_i) \qquad (13)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + k_1\frac{h}{2}\right) \qquad (14)$$

$$k_3 = f(x_i + h, y_i - hk_1 + 2hk_2) \qquad (15)$$

Já o método de Runge-Kutta de quarta ordem é dado pela Eq. (16).

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (16)$$

Sendo,

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (17)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hk_1}{2}\right) \quad (18)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{hk_2}{2}\right) \quad (19)$$

$$k_4 = f(x_{i+1} + h, y_i + hk_3) \quad (20)$$

3.5. ERRO RELATIVO

O erro relativo para o valor aproximado da solução numérica é definido como sendo o erro absoluto sobre valor exato, expresso pela Eq. (21).

$$erro = \frac{y_{exato} - y_{numérico}}{y_{exato}} \quad (21)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ferramenta de tratamento dos dados utilizada está disponível em https://github.com/mauro-moura/table-analyser. O programa foi criado em linguagem de programação Python. Para cada método descrito na Seção 3 é apresentado o gráfico do erro relativo percentual calculado em função dos N subintervalos considerados, mostrados nas figuras de 1 a 5.

Figura 1 - Erros relativos para Euler Explícito

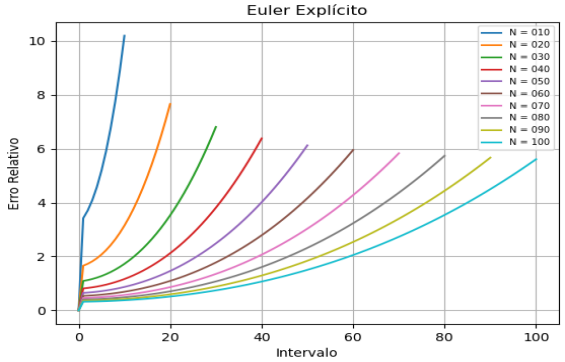


Figura 2- Erros relativos para Euler Implícito

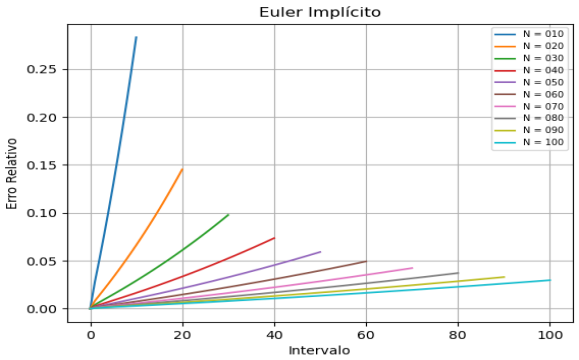


Figura 3 - Erros relativos do método Trapezoidal

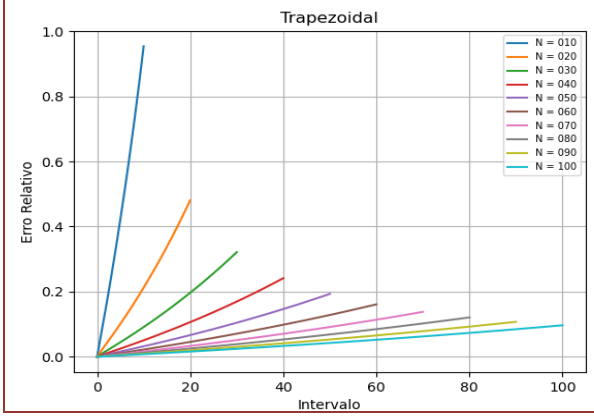


Figura 4- Erros relativos para Runge-Kutta de ordem 3

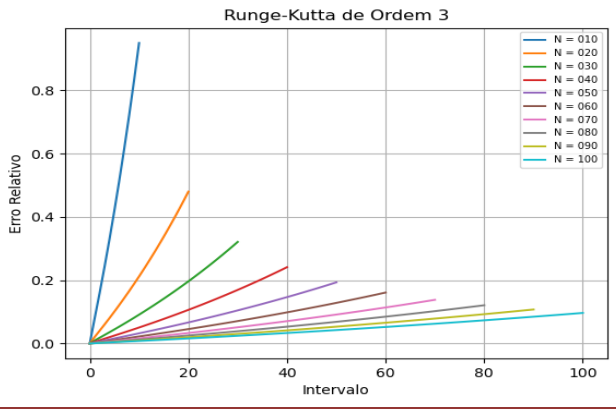
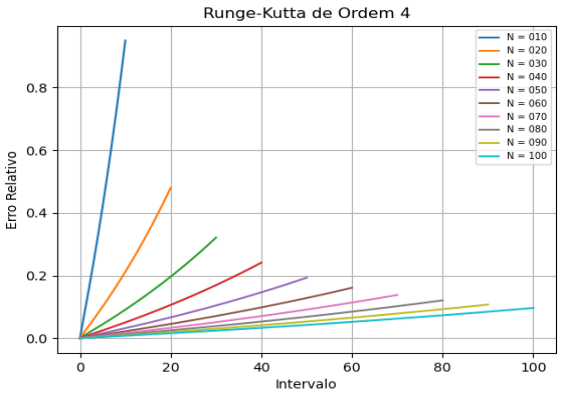


Figura 5- Erros relativos para Runge-Kutta de ordem 4.



Entre o método de Euler explícito e implícito é possível observar pelos gráficos que no ponto inicial o erro relativo é zero, e com a diminuição do passo h através do acréscimo do número de intervalos N, conforme apresentado na Eq. (3), o erro relativo diminui para ambos os métodos, mas a taxas diferentes. O método implícito apresenta valores de erros menores e, com a diminuição do tamanho do passo, a diferença se torna mais expressiva em comparação ao método explícito.

Os outros três métodos, trapezoidal e Runge-Kutta de terceira e quarta ordens, apresentam gráficos bem semelhantes, no entanto, o erro relativo obtido pelos métodos de Runge-Kutta foram menores que o Trapezoidal e idênticos entre si.

A Tabela 2 mostra os resultados do erro percentual máximo para todos os métodos, para 100, 300, 500, 1000 e 10000 subintervalos.

Tabela 2- Comparativo dos Erros Relativos Percentuais Máximos para os cinco métodos

Erro Relativo Máximo	Euler Explícito	Euler Implícito	Trapezoidal	Runge-Kutta 3ª ordem	Runge-Kutta 4ª ordem
N 100	0.56089E+01	0.29697E-01	0.96878E-01	0.96794E-01	0.96794E-01
N 300	0.52654E+01	0.99562E-02	0.32328E-01	0.32272E-01	0.32272E-01
N 500	0.51960E+01	0.57948E-02	0.19213E-01	0.19234E-01	0.19234E-01
N 1000	0.51452E+01	0.29992E-02	0.10336E-01	0.95441E-02	0.95441E-02
N 10000	0.51046E+01	0.11493E-02	0.27961E-02	0.22845E-02	0.22845E-02

Entre os cinco métodos, o método de Euler Implícito apresenta os melhores resultados para os subintervalos destacados na tabela, com uma diminuição expressiva no valor do erro relativo, conforme aumenta-se o número de subintervalos. Os métodos de Runge-Kutta apresentam-se como o segundo melhor método estudado para a resolução do problema em questão, com baixos valores de erro relativo.

Em geral, os métodos de Runge-Kutta de ordem 3 e 4 apresentam maior precisão que o método Euler Implícito quanto o parâmetro λ, definido pela Eq.(4.3), é positivo e constante. Contudo, para equação de depleção que estamos considerando, o parâmetro λ representa valores negativos que variam com o tempo de acordo com os fluxos ϕ_1 e ϕ_2, que no presente trabalho apresentam uma dependência temporal, conforme é descrito em (Araújo, 2011). Conjectura-se que a melhor performance, apresentada pelo método Euler Implícito, deve-se justamente a tal comportamento do parâmetro λ.

É possível notar que os valores numéricos encontrados para cada método, em média, não apresentaram diferenças acentuadas. Apenas o método de Euler Explícito apresentou maiores variações, com valores de erros consideráveis.

5. CONCLUSÕES

Métodos numéricos foram implementados em linguagem de programação FORTRAN para realizar a comparação dos resultados obtidos analiticamente com os resultados numéricos através da análise do erro relativo encontrado. Os dados utilizados para comparação foram os valores calculados para a concentração do Urânio 235, combustível utilizado em um reator teórico do tipo PWR, gerados na dissertação de mestrado utilizada como base para este trabalho.

O método de Euler implícito se mostrou o melhor dos métodos em relação aos demais, visto que os demais necessitam de um tamanho muito pequeno de passo de integração para garantir uma solução numérica mais estável e precisa, ao mesmo tempo em que há maior necessidade de maior esforço computacional.

O objetivo principal do trabalho foi o estudo de técnicas numéricas adequadas à resolução de EDOs. Problemas rígidos impõe dificuldades para convergência numérica quando resolvidos por métodos explícitos, o que não ocorre com métodos implícitos estáveis, sendo estes mais indicados para este tipo de problema.

Existem métodos numéricos altamente performáticos para a resolução de sistemas rígidos de Equações Diferenciais Ordinárias, que permitem uma grande variação no tamanho do passo de integração sem impactar sua convergência.

REFERÊNCIAS

[1] Araújo, L., Moreira. (2011), "Análise Neutrônica de Reatores Térmicos com Recarga Considerando a Detecção de Antineutrinos", Dissertação de Mestrado, IME, Rio de Janeiro.

[2] Carreira, B. L.; Brandi, A. C. (2016), "Métodos de Euler aperfeiçoado e modificado para solução de equações diferencias ordinárias". C.Q.D. – Revista Eletrônica Paulista de Matemática, Bauru, v. 7, p. 4-11, dez. 2016. Edição ERMAC Iniciação Científica.

[3] Galvão, H. P. (2017), "Modelagem Dinâmica do Circuito Primário e Secundário de Reatores PWR Aplicando Critérios de Estabilidade", Projeto de Graduação, UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, Rio de Janeiro.

[4] Heath, M. T. (2002), "Scientific computing: an introductory survey", 2° ed, McGraw-Hill, New York.

[5] Loch, G. G. (2016), "Sistemas Rígidos Associados a Cadeias de Decaimento Radioativo", Dissertação de Mestrado, IME/USP, São Paulo.

[6] Quarteroni, A., Sacco, R., Saleri, F. (2000), "Numerical Mathematics", 2° ed, Springer, New York.

[7] Roza, M., P. (2013), "Solução da Equação de Difusão de Nêutrons pelo Método de Diferenças Finitas de Malha Grossa Analítico", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ//Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro.

[8] Sousa Prata, F. (2011), "Solução das Equações de Depleção Isótopica usando o Método da Decomposição e Soluções Analíticas", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/Programa de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro.

Capítulo 13

Simulação do aproveitamento da energia térmica nas águas da costa brasileira por meio de plantas "OTEC" e "SOTEC" de ciclo fechado

Marcus Godolphim de Castro Neves
Masoud Ghanbari Kashani
Cassio Roberto Macedo Maia
Ricardo Alan Verdú Ramos

Resumo: Atualmente, a busca por novas fontes de energias renováveis tem sido o motivo de pesquisas e investimentos, sendo que a possibilidade de exploração da energia dos oceanos pode ser uma interessante alternativa. Um desses processos é baseado na extração da energia térmica solar acumulada na superfície dos oceanos. Parte dessa energia pode ser transformada em eletricidade e em vários outros subprodutos por meio de um processo conhecido como Conversão da Energia Térmica dos Oceanos (OTEC), que utiliza a diferença de temperatura da água entre a superfície e a profundidade de 1.000 m. As usinas OTEC podem operar em sistemas térmicos aberto, fechado ou híbrido, sendo que, para operar de forma adequada, o local de instalação da usina OTEC deve ter águas com temperatura média da superfície maior que 24°C. O Brasil possui várias regiões que atendem esta condição sendo, portanto, um dos países com boa capacidade de instalação de usina OTEC para ajudar a suprir sua demanda energética. Diante deste contexto, este trabalho apresenta a comparação através de simulação numérica de dois modelos de planta OTEC de ciclo fechado, sendo que a primeira utiliza a água do mar para superaquecimento do fluido de trabalho, enquanto que uma segunda planta é implementado o uso de um coletor solar. Com os parâmetros encontrados na literatura e utilizando as condições brasileiras, foi obtido para o primeiro cenário uma usina capaz de exportar em torno de 14 MW. Para o segundo cenário, com a implantação do coletor solar, 20 MW. Os resultados termodinâmicos mostram que plantas OTEC seguem sendo uma boa alternativa de substituição de termelétricas a gás ou combustíveis fósseis.

Palavras-Chave: Energia, Oceano, OTEC, Coletor Solar.

1. INTRODUÇÃO

Segundo projeções do Plano Nacional de Energia 2030, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (2007), o Brasil deverá atingir 47% de utilização de fontes renováveis em sua matriz energética. Algumas fontes renováveis alternativas têm começado a se tornarem importantes nos últimos anos, como, por exemplo, geração eólica e a fotovoltaica.

Por outro lado, por ter um vasto litoral, o Brasil também pode aproveitar de forma significativa o potencial energético que os oceanos podem oferecer. Existem várias formas de aproveitamento da energia (cinética, química ou térmica) dos oceanos em eletricidade, podendo ser por meio das marés, das correntes oceânicas, das ondas, do gradiente de salinidade (osmose) e da conversão da energia térmica do oceano (ELETRONORTE, 2013).

Os oceanos são grandes acumuladores de energia solar em suas superfícies, podendo, em áreas tropicais, atingir o equivalente a 250 milhões de barris de petróleo por dia. Esta energia térmica acumulada pode ser convertida em energia elétrica por meio de um processo denominado Conversão da Energia Térmica do Oceano, comumente conhecida pela sigla OTEC, originada de *Ocean Thermal Energy Conversion* (ETEMADI *et al.*, 2011).

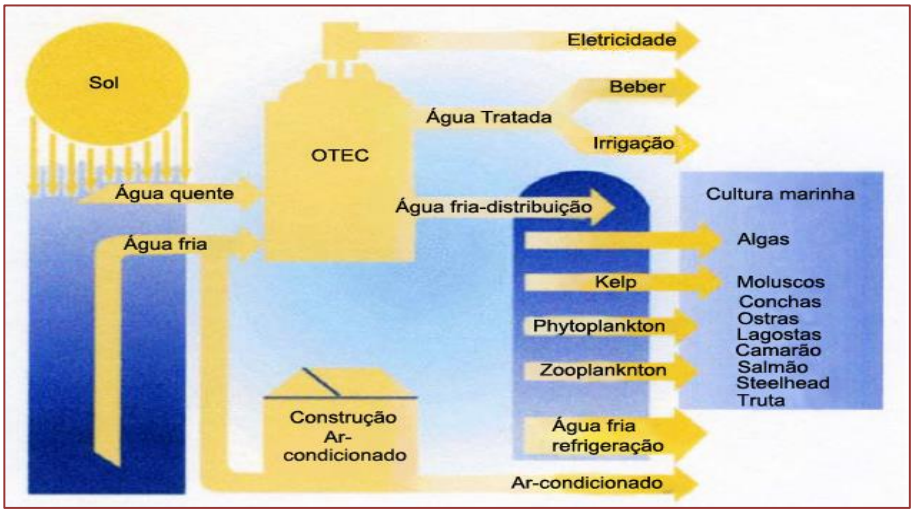
A principal vantagem da geração de eletricidade por uma planta OTEC é que ela é naturalmente renovável e não poluente. Adicionalmente, essa tecnologia produz diversos subprodutos, como água fresca para consumo e irrigação; alimentos marinhos para indústrias, sal e água gelada; dentre outros (Crews, 1997). Um sistema OTEC de 100 MWe pode reduzir uma quantidade de emissões de CO2 em 140.000 toneladas por ano, se comparada com uma usina termelétrica de mesma capacidade (Tahara, Horiuchi e Kojima, 1995).

No entanto, existem algumas desvantagens da geração de eletricidade numa planta OTEC, sendo que dentre eles podem ser destacados os seguintes: baixa eficiência na conversão de energia, necessidade de um investimento inicial alto (entre 50 e 100 milhões de dólares para construir uma planta com capacidade de 10 MWe), custos de energia entre US$0,13/kWh e US$0,65/kWh (UPSHAW, 2012).

De acordo com Etemadi *et al.* (2011), uma planta OTEC trabalha com a diferença de temperatura entre a água da superfície do oceano e a água localizada em um ponto a 1.000 m de profundidade. Em áreas tropicais, este gradiente de temperatura é em torno de 20°C. Essa diferença ocorre porque a água do mar se torna fria conforme a profundidade aumenta (REIS; SOUZA, 2007).

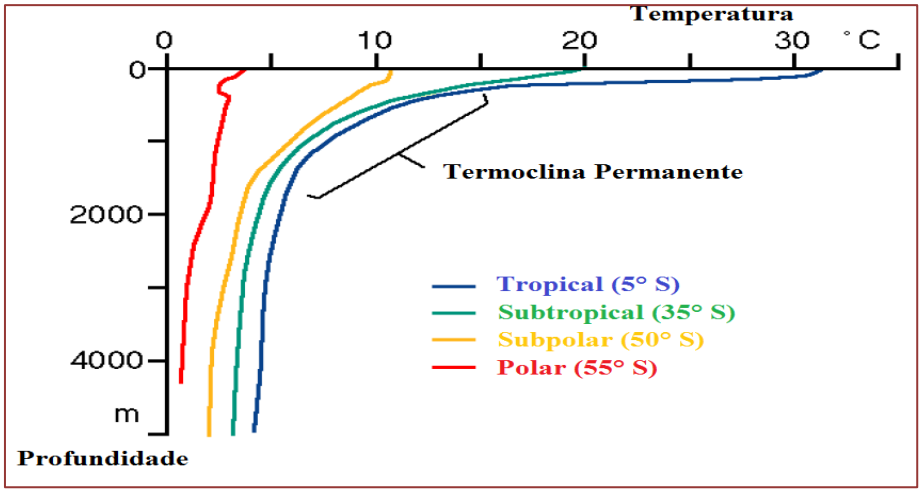
A Figura 1 mostra como um sistema OTEC gera seus subprodutos e a Figura 2 mostra a variação da temperatura da água do oceano de acordo com a profundidade. Embora as usinas OTEC possam operar em ciclos aberto, fechado ou híbrido, neste trabalho os estudos serão concentrados no ciclo fechado, cujo esquema típico simplificado é mostrado na Figura 3.

Figura 1 - Como uma usina OTEC gera os subprodutos



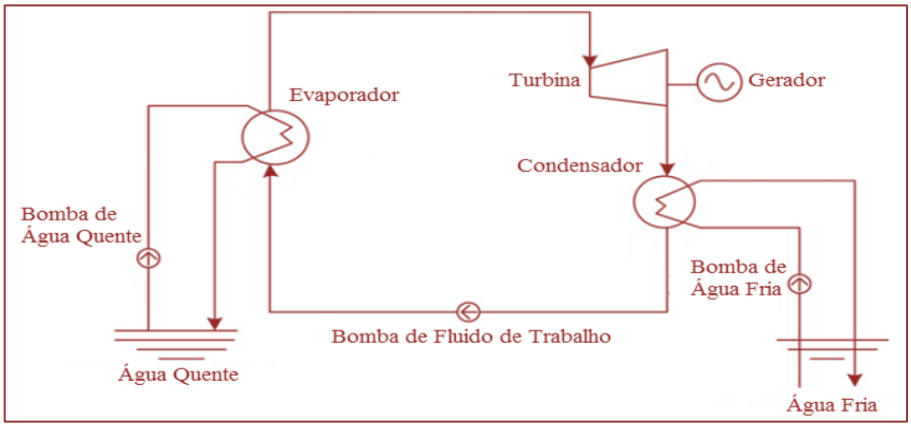
Fonte: (Adaptado de http://www.nrel.gov).

Figura 2 - Estrutura termal típica das águas dos oceanos



Fonte: (REIS; SOUZA, 2007).

Figura 3 - Ciclo fechado de uma planta OTEC



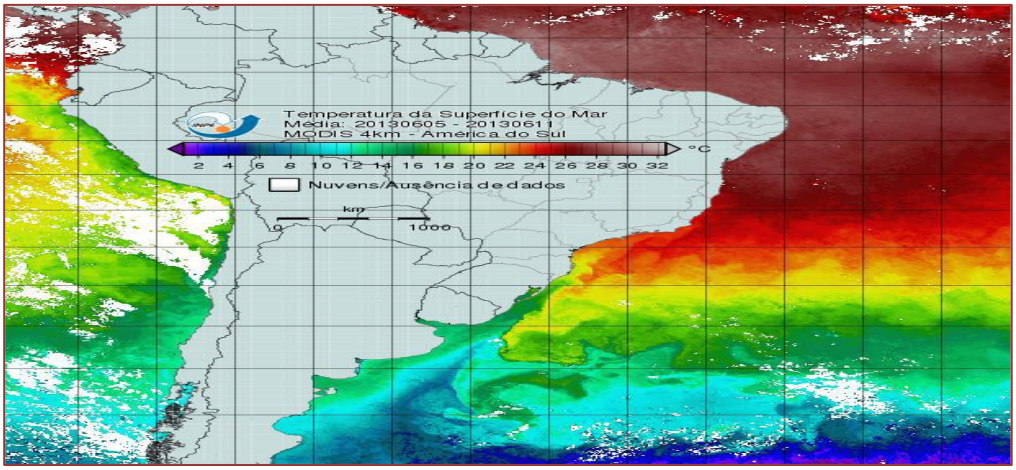
Fonte: (FAIZAL; AHMED, 2013).

O ciclo fechado de uma planta OTEC opera segundo um ciclo de Rankine. O fluido de trabalho é um fluido com baixa temperatura de ebulição, sendo que o mais utilizado é a amônia, sendo que Bharathan (2012) também recomenda estudar a utilização do propileno. O ciclo de Rankine de uma OTEC consiste em dois trocadores de calor, uma turbina a vapor e uma bomba.

A água quente obtida na superfície é bombeada para o trocador de calor e, então, o fluido de trabalho aumenta sua temperatura até mudar de estado para o de vapor superaquecido. O vapor produzido aciona uma turbina de baixa pressão (UPSHAW, 2012) e, após sair da turbina, como vapor com título, vai para o condensador, onde troca calor com a água fria da profundidade tornando-se líquido, sendo depois bombeado novamente para o evaporador (FAIZAL; AHMED, 2013).

Para aumentar a geração de energia elétrica num ciclo fechado pode ser adicionado um outro estágio. Cada estágio é um outro ciclo fechado, onde a saída de água quente do primeiro estágio alimenta o evaporador do segundo estágio e a água gelada entra no condensador do segundo estágio e sua saída alimenta o condensador do primeiro estágio, fazendo o caminho oposto da água quente (UPSHAW, 2012). Na Figura 4 é mostrada a média da temperatura da superfície da água da costa brasileira nos quatro meses do verão de 2013.

Figura 4 - Temperatura da superfície das águas na costa brasileira no verão



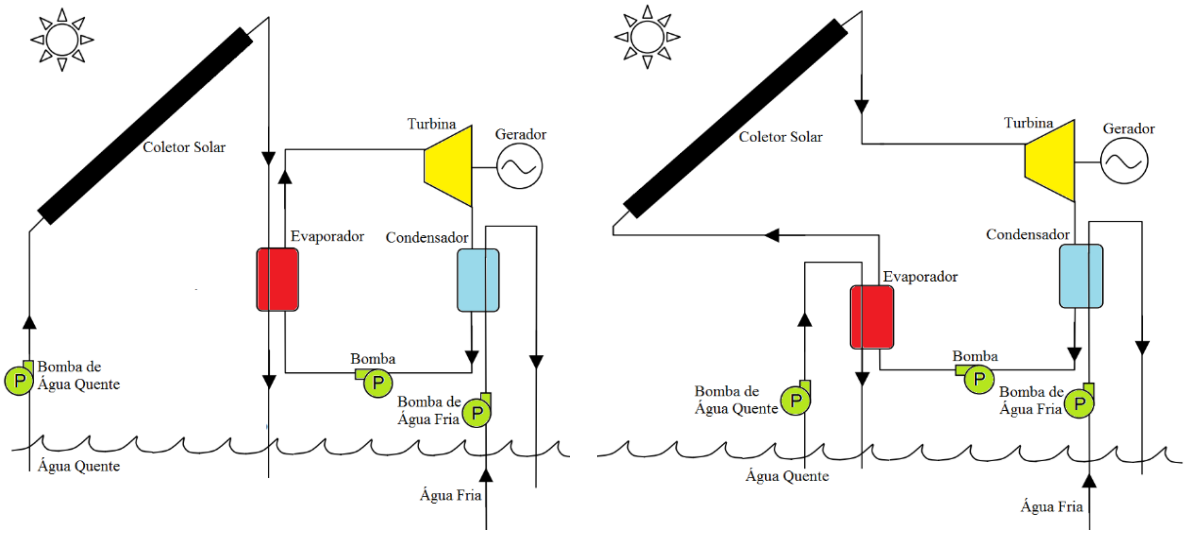
Fonte: (http://satelite.cptec.inpe.br).

É possível observar que a temperatura da costa do nordeste brasileiro fica em torno de 28°C, o que sugere que este é um local que possui um bom potencial para instalação de uma usina OTEC, pois, segundo Nihous (2007), a média da temperatura da água da superfície deve ser acima de 24°C para um bom aproveitamento do gradiente térmico dos oceanos.

Para aumentar a eficiência térmica dos ciclos OTEC, Yamada, Hoshi e Ikegami (2009) descreveram dois outros métodos para utilizar não apenas a energia térmica acumulada nos oceanos, mas, também, a energia térmica solar obtida através da radiação. Este método foi nomeado Conversão de Energia Térmica dos Oceanos com Coletores Solares (SOTEC, abreviação em inglês de *Solar Boosted Ocean Thermal Energy Conversion*), que consiste em um coletor solar instalado no ciclo fechado de duas formas distintas: direta e indireta.

No método indireto, a água quente da superfície passa pelo coletor solar, aumentando sua temperatura em até 20°C. No método direto, o coletor solar é instalado após o evaporador, porém neste método é o fluido de trabalho que passará pelo coletor solar, aumentando sua temperatura e entropia antes de acionar a turbina. As Figuras 5a e 5b mostram os sistemas indireto e direto de SOTEC, respectivamente.

Figura 5 - Método SOTEC indireto (a) e direto (b).

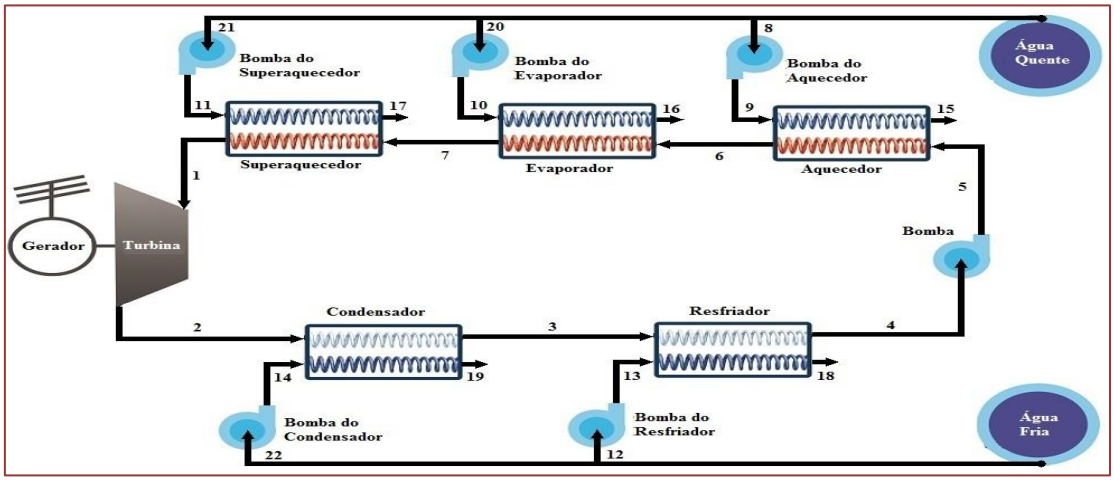


a) SOTEC indireto. **b)** SOTEC direto.

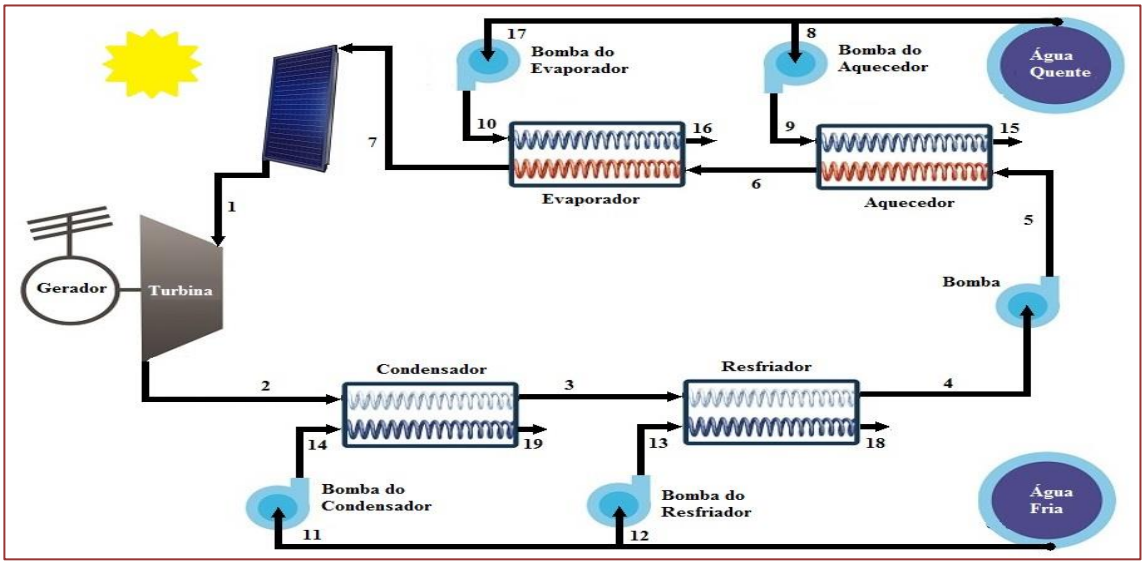
2. DESCRIÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS

Os casos simulados são de uma planta OTEC de ciclo fechado e com um estágio e uma planta SOTEC direta, como pode ser observado na Figura 6. De modo geral, trata-se de um ciclo Rankine com turbina, bomba, pré-aquecedor, evaporador, superaquecedor, condensador e resfriador, sendo que o fluido de trabalho é a amônia. Para a planta SOTEC, o superaquecedor foi substituído por um coletor solar. Os trocadores de calor possuem bombas para alimentação de água da superfície e de profundidade. O aquecedor, superaquecedor e resfriador foram adicionados para aumentar a eficiência do condensador e do evaporador, porque a diferença de temperatura entre os dois fluidos (amônia e água) é muito baixo e a quantidade de calor necessária para o ciclo é alta. Deste modo, é necessário a utilização de um trocador de calor maior e mais eficiente. De acordo com Upshaw (2012), Uehara et al. (2009) e Avery e Hu (1994) pode se observar que o coeficiente global de troca de calor para o condensador, evaporador e outros trocadores de calor se encontram em uma faixa entre 3,5 kW/m^{2}K e 4,5 kW/m^{2}K. A eficiência das bombas e turbina foram obtidas com base em dados de Upshaw (2012) e Bharathan (2011).

Figura 6 -desenho esquemático das plantas Otec (a) e Sotec (b) simuladas



a) Planta OTEC.



b) Planta SOTEC.

Para a simulação numérica das plantas foi feita ususo do programa EES® - *Engineering Equation Solver* (Klein e Alvarado, 1995). Os principais parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor
Temperatura da água quente (°C)	26
Temperatura da água fria (°C)	4,5
Eficiência da bomba (%)	85
Eficiência da turbina (%)	85
Coeficiente global de transferência de calor (evaporador e condensador) (kW/m^{2}K)	4,25
Coeficiente global de transferência de calor (outros trocadores de calor) (kW/m^{2}K)	3,75
Eficiência do gerador elétrico (%)	98
Perda de carga no aquecedor (bar)	0,048
Perda de carga no evaporador (bar)	0,108
Perda de carga no superaquecedor (bar)	0,162
Perda de carga no condensador (bar)	0,086
Perda de carga no resfriador (bar)	0,119
Área de coletor solar (m^2)	3.532

3. METODOLOGIA

Considerando o processo em regime permanente e assumindo que todas as variações de energias cinética e potencial são desprezíveis, bem como a conservação da massa, a primeira e a segunda lei da termodinâmica para um volume de controle são representadas da seguinte forma simplificada (VAN WYLEN; BORGNAKKE; SONNTAG, 1994):

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

$$\sum_j \dot{Q}_{vc,j} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (2)$$

$$\dot{S}_{ger,vc} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc,j}}{T_j}\right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (3)$$

onde:

$\dot{m}_e$ é a vazão mássica de entrada no volume de controle [kg/s];

$\dot{m}_s$ é a vazão mássica de saída do volume de controle [kg/s];

$\dot{Q}_{vc}$ é o fluxo de calor [kW];

$\dot{W}_{vc}$ é a potência gerada ou consumida pelo volume de controle [kW];

h_e é a entalpia do fluido na entrada do volume de controle [kJ/kg];

h_s é a entalpia do fluido na saída do volume de controle [kJ/kg];

$\dot{S}_{ger}$ é o fluxo de entropia gerada no volume de controle [kW/ K];

s_e é a entropia do fluido na entrada do volume de controle [kJ/kg K];

s_s é a entropia do fluido na saída do volume de controle [kJ/kg K];

T é a temperatura [K].

A análise energética é capaz de levar em conta a qualidade da energia e as fontes de irreversibilidade no processo, sendo necessária a utilização da análise exergética. De acordo com Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996), a exergia específica total é composta pela exergia física e química:

$$\overline{\mathrm{ex}}_{\mathrm{total}} = \overline{\mathrm{ex}}_{\mathrm{fis}} + \overline{\mathrm{ex}}_{\mathrm{qui}} \quad (4)$$

onde:

$\overline{ex}_{total}$: exergia molar total [kJ/kg mol];

$\overline{ex}_{fis}$: exergia molar física [kJ/kg mol];

$\overline{ex}_{qui}$: exergia molar química [kJ/kg mol].

Uma vez que o ciclo OTEC não possui combustível e desconsiderando os efeitos das energias cinética e potencial, a exergia física de um escoamento é avaliada baseada em um estado de equilíbrio restrito do sistema em um ambiente padrão ou estado morto (P_0, T_0), por meio de:

$$\overline{ex}_{total} = \overline{ex}_{fis} = \left(\bar{h} - \bar{h}_0\right) - T_0(\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (5)$$

onde:

$\bar{h}_0$: entalpia do estado morto [kJ/kg mol];

$\bar{s}_0$: entropia do estado morto [kJ/kgK mol].

A área do coletor solar (S) pode ser calculada em função do calor absorvido do sol ($\dot{Q}_{cs}$); da intensidade da radiação solar (I), que varia dependendo da localização onde a planta será instalada; e do rendimento dos coletores solares (R), conforme segue (Baptista, 2006):

$$S = \frac{\dot{Q}_{cs}}{I\,R} \quad (6)$$

Desta forma, para se calcular o aquecimento da amônia na saída do coletor solar, pode ser utilizada a Primeira Lei da Termodinâmica aplicada ao coletor solar, conforme segue:

$$\dot{Q}_{cs} = \dot{m}_{ft}(h_e - h_s) \quad (7)$$

Segundo o INMETRO (2015), a eficiência média de coletores solares para aquecimento de água para banho é em torno de 60%. Neste trabalho, foi usada uma abordagem mais conservadora, estimando o rendimento dos coletores solares em 50%, por não haver referências sobre a eficiência de coletores solares específicos para OTEC. Os coletores para OTEC devem ter tubulação mais resistente para evitar vazamentos de amônia.

A eficiência global da planta OTEC baseada na Primeira Lei da Termodinâmica é a razão da energia disponível (seja ela térmica ou elétrica) para exportação e da potência fornecida, de acordo com:

$$\eta_{planta} = \frac{\sum \dot{W}_{turb} - \sum \dot{W}_{bomb}}{\dot{Q}_{agua,ev}} \quad (8)$$

A eficiência de Carnot é um bom parâmetro para verificação de como a planta OTEC possui uma eficiência baixa, porém se comparado à eficiência de Carnot com a eficiência global, pode-se observar que a planta OTEC possui uma eficiência global acima de 50% da sua eficiência máxima. A eficiência de Carnot pode ser calculada por:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (9)$$

4. RESULTADOS

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os dados de pressão, temperatura, fluxo de massa e de algumas propriedades termodinâmicas obtidos através da simulação no EES® para as plantas OTEC e SOTEC, respectivamente.

Tabela 2 - Resultados termodinâmicos para a planta OTEC

Ponto	*P* (bar)	*T* (°C)	*h* (kJ/kg)	*s* (kJ/kg K)	$\dot{m}$ (kg/s)	*ex* (kJ/kg)
1	8,58	22,0	1.486,16	5,396	300	299,027
2	5,44	6,5	1.437,79	5,427	300	241,414
3	5,44	6,5	230,20	1,109	300	321,236
4	5,44	6,0	227,90	1,100	300	321,619
5	8,58	6,1	228,46	1,101	300	321,881
6	8,58	20,0	293,80	1,329	300	319,243
7	8,58	20,0	1.480,14	5,376	300	298,970
8	1,01	26,0	109,03	0,381	1.633	0,056
9	1,06	26,0	109,03	0,381	1.633	0,056
10	1,09	26,0	109,04	0,381	29.654	0,066
11	1,15	26,0	109,04	0,381	156	0,066
12	1,01	4,5	19,02	0,069	174	3,069
13	1,13	4,5	19,03	0,069	174	3,079
14	1,10	4,5	19,03	0,069	90.602	3,079
15	1,01	23,0	96,85	0,339	1.633	0,398
16	1,01	23,0	96,55	0,339	29.654	0,098
17	1,01	23,1	96,85	0,339	156	0,488
18	1,01	5,48	23,13	0,083	174	3,005
19	1,01	5,52	23,32	0,084	90.602	2,896
20	1,01	26,0	109,03	0,381	29.654	0,056
21	1,01	26,0	109,03	0,381	156	0,056
22	1,01	4,5	19,02	0,069	90.602	3,069

Tabela 3 - Resultados termodinâmicos para a planta SOTEC

Ponto	*P* (bar)	*T* (°C)	*h* (kJ/kg)	*s* (kJ/kg K)	$\dot{m}$ (kg/s)	*ex* (kJ/kg)
1	8,54	28,0	1.503,69	5,455	300	298,966
2	5,44	6,5	1.437,79	5,427	300	241,414
3	5,44	6,5	230,20	1,109	300	321,236
4	5,44	6,0	227,90	1,100	300	321,619
5	8,58	6,1	228,46	1,101	300	321,881
6	8,58	20,0	293,80	1,329	300	319,243
7	8,58	20,0	1.480,14	5,376	300	298,970
8	1,01	26,0	109,03	0,381	1.633	0,056
9	1,06	26,0	109,03	0,381	1.633	0,056
10	1,09	26,0	109,04	0,381	29.654	0,066
11	1,01	4,5	19,02	0,069	90.602	3,069
12	1,01	4,5	19,02	0,069	174	3,069
13	1,13	4,5	19,03	0,069	174	3,079
14	1,10	4,5	19,03	0,069	90.602	3,079
15	1,01	23,0	96,85	0,339	1.633	0,398
16	1,01	23,0	96,55	0,339	29.654	0,098
17	1,01	26,0	109,03	0,381	29.654	0,056
18	1,01	5,48	23,13	0,083	174	3,005
19	1,01	5,52	23,32	0,084	90.602	2,896

As eficiências obtidas para os ciclos OTEC e SOTEC foram, respectivamente, 3,80% e 5,12%. As eficiências de Carnot correspondentes foram de 5,42% e 7,31%. Assim, observa-se que para estes dois casos, a eficiência global do ciclo é de aproximadamente 60% da eficiência de Carnot. A potência produzida pelas turbinas, consumida pelas bombas e a disponível para exportação são apresentadas na Tabela 4. A área do coletor solar necessária para fornecer a quantidade de calor suficiente para superaquecer o fluido de trabalho na planta SOTEC é igual a 3.532 m^2. Obviamente, essa área poderá ser reduzida se a eficiência dos coletores solar for aumentada.

Tabela 4 - Potências consumidas e geradas nos equipamentos das plantas OTEC e SOTEC

Potências dos Equipamentos [kW]		
Equipamento	OTEC	SOTEC
Turbina	14.510,0	21.498,5
Bomba de Fluido de Trabalho	175,0	175,0
Bomba de Água do Aquecedor	8,5	8,5
Bomba de Água do Evaporador	275,5	275,5
Bomba de Água do Superaquecedor	2,5	-
Bomba de Água do Condensador	898,0	898,0
Bomba de Água do Resfriador	2,5	2,5
Total líquido	**13.148**	**20.139**

5. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos nas simulações, é possível perceber que uma planta OTEC ou SOTEC de ciclo fechado pode ser usada para gerar energia elétrica no nordeste do Brasil. Mesmo que a planta possua uma baixa eficiência energética, ela pode gerar consideráveis quantidades de energia. Essa quantidade, por exemplo, é suficiente para substituir uma planta que funciona com motores estacionários a diesel, por exemplo, os quais possuem um custo de geração de energia comparativamente mais alto do que outras fontes de energia no Brasil.

Com a capacidade de exportação de 14 MW de energia para uma OTEC e 20 MW, para SOTEC, essa nova tecnologia se mostra uma boa alternativa para substituição de fontes de energia altamente poluidoras e caras, como o diesel.

Apesar de ser necessária uma grande área de coletores solar para superaquecer o fluido de trabalho em uma planta SOTEC, um aumento de eficiência dos coletores para 60%, implica em uma redução de área

para 2.943 m^2. Uma redução de 16% de área, o que melhoria muito a viabilidade do projeto. Porém, mesmo com toda essa área, o aumento da geração de energia substituindo um equipamento complexo como um trocador de calor para baixas diferenças de temperaturas pode resultar em um custo menor para a geração de energia.

Entre outras possibilidades possíveis de serem estudadas é utilizar a água do mar nos condensadores e fazer uso de concentradores solar para aumentar o superaquecimento do fluido de trabalho. No entanto, para decidir qual planta apresenta maior viabilidade é necessário proceder uma análise econômica após análise termodinâmica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq por conceder bolsa de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

[1] AVERY, W. H., HU, C., 1994. Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC. Oxford University Press.

[2] BAPTISTA, A. S. C., 2006. Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em resorts no nordeste do Brasil. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[3] BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M., 1996. Thermal design & optimization. New York: John Wiley & Sons, 542 p.

[4] BHARATHAN, D., 2011. Staging Rankine cycles using ammonia for OTEC power production.

[5] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Technical Report NREL/TP-5500-49121, <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49121.pdf>, 18 p.

[6] CREWS, R., 1997. OTEC Sites: http://www.trellis.demon.co.uk/reports/otec_sites.html. Acesso em: 18 jan. 2013.

[7] ELETRONORTE (Brasil). Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas. Introdução às Energias Renováveis. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/64299782/Introducao-as-EnergiasRenovaveis-Apostila-Eletronorte>. Acesso em: 23 out. 2013.

[8] ETEMADI, A.; EMDADI, A.; ASEFAFSHAR, O.; EMAMI, Y., 2011. Electricity generation by the ocean thermal energy. Energy Procedia. vol.12, pp. 936-944.

[9] FAIZAL, M.; AHMED, M. R., 2013. Experimental studies on a closed cycle demonstration OTEC plant working on small temperature difference. Renewable Energy. vol. 51, pp. 234-240.

[10] INMETRO. Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água: coletores Solares. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

[11] KLEIN, S. A.; ALVARADO, F. L., 1995. EES - Engineering Equation Solver. Middleton: F-Chart Software.

[12] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Plano nacional de energia 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME-EPE, 2007. 226 p.

[13] NIHOUS, G., 2007. An estimate of Atlantic Ocean thermal energy conversion (OTEC) resources. Ocean Engineering, vol. 34, n. 17-18, pp. 2210-2221.

[14] REIS, R. A. N.; SOUZA, R. B., 2012. Climatologia da estrutura termal do oceano Atlântico sudoeste a partir de dados observacionais de XBTS. Relatório Final de Iniciação Científica, CRS/INPE - MCTI, Santa Maria, RS, 7 p.

[15] TAHARA, K.; HORIUCHI, K.; KOJIMA, T., 1995. Ocean thermal energy conversion (OTEC) system as a countermeasure for CO_2 problem - Energy balance and CO_2 reduction potential. Energy Conversion and Management, vol. 36, n. 6-9, pp. 857-860.

[16] UEHARA, H.; KUSUDA, H.; MONDE, M.; NAKAOKA, T.; SUMITOMO, H., 2009. Shell and plate type heat exchangers for OTEC plants. Journal of Solar Energy Engineering vol. 106, n. 3, pp. 286-290.

[17] UPSHAW, C. R., 2012. Thermodynamic and economic feasibility analysis of a 20 MW ocean thermal energy conversion (OTEC) power plant. Master Degree Dissertation, The University of Texas at Austin.

[18] VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E., 2003. Fundamentos da termodinâmica clássica. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 589 p.

Capítulo 14

Simulation of tubular reactor for production of methacrylic acid via hydrolysis of methacrylamide sulfate

Izabela Silva Freitas
Aryane Maria de Oliveira Lima
Edson de Paiva Alves
Luiz Antônio Magalhães Pontes
Guilherme João Musse Neto

Abstract: Methacrylic acid (MAA) is used in the chemical industry as a high versatile monomer. Industrially, it is produced in homogeneous stirred reactor, via hydrolysis of methacrylamide sulfate, and catalyzed by sulfuric acid. However, the use of tubular reactor can bring economic gains to the process, and, in this context, the objective of this article was to evaluate, in a preliminarily way, the replacement of the stirred reactor, currently existing in the industrial plant, for a tubular reactor. The software Aspen Plus was used to develop the reactor simulation and its design. A reactor with 1.5" in diameter and 30 meters in length was obtained as an optimal configuration, operating at 150ºC. This configuration allows to reach better results as greater operational continuity, less waste generation, lower maintenance costs and less physical space required for installation.

Keywords: Methacrylic Acid; Tubular Reactor; Simulation.

1. INTRODUCTION

Methacrylic acid is widely used in obtaining polymeric materials such as acrylic plastic sheeting, casting resins, acrylic varnishes, polyvinyl chloride modifiers, ion exchange resin, automotive industry, electronic adhesives, it is also used for the synthesis of methyl methacrylate (MMA) and others. The commercial route used by the company Unigel Petrochemical for the production of methacrylic acid (MAA) includes a complex series of reaction processes, namely: 1- Obtaining hydrocyanic acid (HCN) from the ammoxidation of natural gas or as a by-product of the acrylonitrile production process; 2- Obtaining acetone cyanohydrin (ACH) from the reaction of propanone with hydrocyanic acid (HCN), 3- acid hydrolysis of ACH in the presence of sulfuric acid generating intermediates α-sulfatoisobutyramide ("SIBAM") and α-hydroxyisobutyramide ("HIBAM"); 4- thermal cracking of a mixture rich in SIBAM and HIBAM to obtain methacrylamide sulfate and, 5- hydrolysis of methacrylamide sulfate (Mahboub et al., 2018).

The hydrolysis step of methacrylamide sulfate (Reaction 1) is carried out in continuous stirred reactors, at temperatures from 80ºC to 110ºC, for a residence time between 2 - 4 hours, and atmospheric pressure (Ullmann, 2005). On the other hand, Balák and Polievka (1983) observed that below 70ºC the reactant conversion is negligible and temperatures above 110ºC make it difficult to use the stirred reactor, due to excessive vaporization of methacrylic acid. However, the homogeneous reaction (1) can occur in tubular reactors with economic advantages, maintaining the activity and selectivity to the desired product, at a temperature that varies between 50ºC and 210ºC, preferably between 90ºC and 150ºC (Carlson, DeCourcy, Juliette, 2004; Gropp et al., 2009).

$$H_2C{=}C(CH_3)\text{-}CONH_3^+HSO_4^- + H_2O \rightarrow H_2C{=}C(CH_3)\text{-}COOH + NH_4HSO_4 \qquad (1)$$

One problem with the process is the formation of MAA polymers at the top of the stirred reactor. To minimize this problem, polymerization inhibitors such as phenothiazine, hydroquinone and methyl hydroquinone are used in the steps of ACH hydrolysis, thermal cracking and methacrylamide sulfate hydrolysis. When the MAS hydrolysis occurs at temperatures above 99.5 ºC, at atmospheric pressure, the MAA vaporizes as azeotrope with water and condenses on the vessel surface. The concentration of inhibitor in the condensed liquid is insufficient or none, which potentiates the formation of polymers of methacrylic acid, despite the techniques adopted to prevent liquid stagnation in the absence of inhibitor. In the industrial plant, polymers formed can: (i) block several reactor nozzles; (ii) interfere with reactor level control, and (iii) damage auxiliary rotating equipment.

Replacing the continuous stirred reactor for a tubular reactor has the following advantages: maintenance of the liquid phase; the decrease in the formation of polymers and, consequently, the reduction in the amount of solid waste and, the increase in operational continuity, which results in greater annual production of MAA. In this context, this work aimed to make a preliminary assessment of the replacement of the current stirred reactor for a tubular reactor through the simulation of the methacrylamide sulfate (MAS) in order to obtain the MAA.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. SIMULATION OF THE TUBULAR REACTOR

The tubular reactor was simulated in Aspen Plus software, which has a database with the physicochemical properties of the components involved. It is noteworthy that the standard enthalpy of formation and standard free energy of NH_4HSO_4 were entered into the software from data available in Cheméo (2016), which used o Joback method (Kosuru *et al.*, 2019; Ali, 2007) for estimation.

The kinetic model proposed by Balák and Polievka (1983), presented in Equation 2, was used to estimate the reaction rate. The authors defined the reaction order, obtained by linear regression, as approximately 1.

$$r\left[\frac{mol}{l*s}\right] = 1.85 * 10^{8}[s^{-1}] * c * exp\left(\frac{-86.2\left[\frac{kJ}{mol}\right]}{RT}\right) \quad (2)$$

For: - c: Initial concentration of MAS (mol/l).

The optimal conversion was obtained in the simulation considering the temperature variation within the ideal range for the process, the molar ratio H_2O:ACH and the size of the reactor. For each combination of factors, the dependent variables, such as surface velocity of the fluid in the reactor, Reynolds number and pressure drop, were determined.

The production base was defined as 1 t/h of MAA, with 99% conversion of the reagent, MAS. The MAS concentration was kept constant, considering the molar ratio H_2SO_4:ACH of 1.5, a factor commonly recommended at the beginning of the reaction (Ullmann, 2005). The pressure at the inlet of the reactor was set at 2 kgf/cm² to keep the mixture in the liquid phase.

3. RESULTS AND DISCUSSION

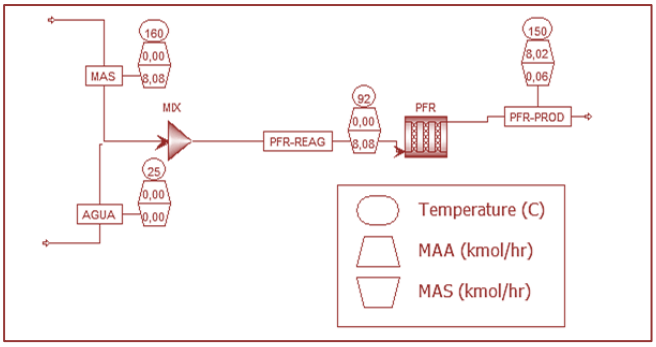
The test settings performed are shown in Table 1.

Table 13 - Summary of simulation configuration and results obtained

Molar Ratio (H_2O:ACH)	4			6						6		6,5
Temperature (°C)	105	110	130	80	110	130				150		
Length (m)	9			24		3	8	10	20	24	30	30
Surface velocity (m/s)	0.61			0.69						0,69		0.72
Reynolds	51,884			64,310						64,310		67,185
Pressure drop (x 10^{-2} kgf/cm²)	2			4		1	2	2	4	5		
Conversion (%)	11	15	40	6	37	20	41	48	69	97	98	99

The use of a multi-tubular reactor is preferable because it minimizes the effects of mass and energy transfer. However, feeding the system in a fractional way might not characterize turbulent flow. Thus, the preliminary design of the reactor considered the total length obtained for the best conversion in the studied process conditions, to avoid low velocity zones and, also, high temperatures that lead to the formation of polymers. For this reason, a single tube reactor with a diameter of 1.5" was chosen in order to maintain the speed close to 1m/s and Reynolds above 4000, according to the schematic drawing shown in Figure 1.

Figure 1 - Aspen Plus simulation diagram



For a production amount of 1t/h with 99% MAS conversion, the performed simulations showed that the tubular reactor with 0.4 m^3 (6"x 24 meters) at a temperature of 110°C would be adequate. For the same conversion and temperature, the stirred reactor would need 7.6 m^3, equivalent to 120 minutes of residence time.

The simulation result at 150°C showed that the conversation of 99% would be achieved in a tubular reactor with 1.5" in diameter and 30 meters in length (0.034 m^3). The much smaller volume of the tubular reactor results in less investment in equipment and facilities.

3. CONCLUSION

Through the results of the simulations, a tubular reactor with a diameter of 1.5" and length of 30 meters was obtained, with an operating temperature of 150°C for the production of 1 t/h of methacrylic acid with 99% conversion of reagent. This kind of reactor in the production of methacrylic acid provides the mitigation of heavier products formation resulting from the unwanted polymerization of MAA, which maintains operational continuity, increases production, and reduces the amount of waste generated. Endless, intrinsic advantages of the tubular reactor can be easily identified in the results, such as: lower maintenance costs, less physical space required for installation and absence of moving parts.

REFERENCE

[1] ALI S A, Thermodynamic aspects of hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation. Pet Sci Technol, [S.L.], v. 25, n. 7, p. 841-852, 27 jul. 2007.

[2] BALÁK J, POLIEVKA M, Kinetics of hydrolysis of methacrylamide sulfate in the medium of sulfuric acid. Chem. zvesti, v. 37, p. 61-69, 1983.

[3] CHEMÉO. Chemical properties of ammonium bisulfate, 2016. Disponível em: https://www.chemeo.com/cid/59-810-7/Ammonium%20bisulfate. Acesso em: 05 abr. 2020.

[4] CURTIS I C Jr, DeCOURCY M S, JOHN J J, Process for production of methacrylic acid. Depositante: Rohm and Haas Company. US n. 7.253.307 B1. Depósito: 12 nov. 2004. Concessão: 07 ago. 2007.

[5] GROPP U, SOHNEMANN S, PROTZMANN G, MERTZ T, Method for producing methacrylic acid. Depositante: Evonik Roehm GmbH. US n. 8.575.388 B2. Depósito: 13 jan. 2009. Concessão: 05 nov. 2013.

[6] KOSURU R K, ANIYA V, KUMARI A, CHITTURI H S, SREERAMOJU A, THELLA P K, SATYAVATHI B, Measurement and correlation studies of phase equilibria and thermophysical properties of 4-tert-butylbenzaldehyde. J. Mol. Liq., [S.L.], v. 280, p. 11-17, abr. 2019.

[7] MAHBOUB M J D, DUBOIS J, CAVANI F, ROSTAMIZADEH M, PATIENCE G S, Catalysis for the synthesis of methacrylic acid and methyl methacrylate. Chem. Soc. Ver., v. 47, n. 20, p. 7703-7738, 2018.

[8] ULLMANN'S. Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH, 2005.

Capítulo 15

Metalografias de ligas com memória de forma do sistema Cu-Al

Carlos Cássio de Alcântara
Daniel Nicolau Lima Alves

Resumo: Neste trabalho foram apresentadas diversas microestruturas, obtidas por microscopia óptica, referentas a ligas com memória de forma do sistema Cu-Al. As ligas foram preparadas através da fusão de metais puros em um forno de indução sob atmosfera ambiente. Para a realização dos ensaios de MO, todas as amotras passaram por lixamento em lixas de 80, 100, 200, 400, 600 e 1200. Na sequência, foi realizado um polimento com aluminas de granulometria de 1μm e 0,3μm. As soluções de ataque para vizualização dos contornos de grão foram consultadas na norma ASTM E407 – 07. As imagens foram obtidas através de um microscópio óptico da Carl Zeiss - Axiotech 30 e do *software* de imagem Analysis. Por fim, foram apresentadas microestruturas variadas referentes a LMFs do sistema Cu-Al, desde microestruturas de liga em estado bruto de fundição até diferentes microestruturas resultantes da transformação martensítica, seja esta por resfriamento, temperatura ou solicitação mecânica.

Palavras-Chave: Memória de forma, Microestrutura, Metalografia, Ligas Cu-Al.

1. INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMFs) integram um grupo especial de materiais denominado materiais inteligentes. Elas apresentam capacidade de recuperação da forma memorizada, isto é, após dada deformação, mediante a um gradiente térmico ou a um campo magnético, tais materiais retornam à sua forma original pré-definida. Tal fenômeno é conhecido como efeito de memória de forma (EMF) (BARBARINO, FLORES, et al., 2014, p. 1; CALLISTER JR, WILLIAM e RETHWISCH, 2016, p. 12). As LMFs podem ser fabricadas a partir diferentes sistemas: Cu-Al, Ni-Ti entre outros (ALANEME e OKOTETE, 2016, p. 5-8). De modo geral, as ligas com memória de forma possuem duas fases sólidas distintas (austenita e martensita) as quais comutam entre si em função dos níveis de carregamentos mecânicos, térmicos e/ou magnéticos. A Austenita é a fase de alta temperatura, e a Martensita é fase de baixa temperatura (SONG, MA e LI, 2006, p. 1267), sendo esta última caracterizada pela presença de placas (LA ROCA, ISOLA, *et al.*, 2015, p. 1136) e/ou agulhas (BOULLAY e SCHRYVERS, 2001, p. 1). As propriedades características das LMFs proporcionam a sua aplicação em diversos campos: automotivo, aeroespacial, robótica e biomédica são alguns deles (JANI, LEARY, *et al.*, 2014, p. 1079).

Várias pesquisas têm sido realizadas na busca de melhor compreender esse materiais, e assim possibilitar melhorias de suas propriedades. Para estes fins, realiza-se uma série de ensaios, a saber: calorimetria exploratória diferencial (DSC) para determinação das temperaturas de transformação martensítica (YANG, ZHANG, et al., 2017, p. 20), carregamento cíclico para determinação de propriedades superelásticas (LIU, HUANG e XIE, 2015, p. 2012), difração de raios de X (DRX) para a identificação de fases (YANG, WANG, *et al.*, 2016, p. 216) e técnicas de microscopia para a análise da evolução microestrutural (WANG, YANG, *et al.*, 2014, p. 3198-3199), sendo a técnica de microscopia óptica (MO) a mais comum entre elas (COLPAERT, 2008, p. 68).

Ante ao exposto, motivado pela importância desse grupo de materiais, todo o seu potencial de aplicação e escopo de contribuir para um estudo inicial acerca das LMFs, o presente trabalho apresenta diversas microestruturas obtidas em LMFs do sistema Cu-Al a partir do ensaio de microscopia óptica.

2. METODOLOGIA

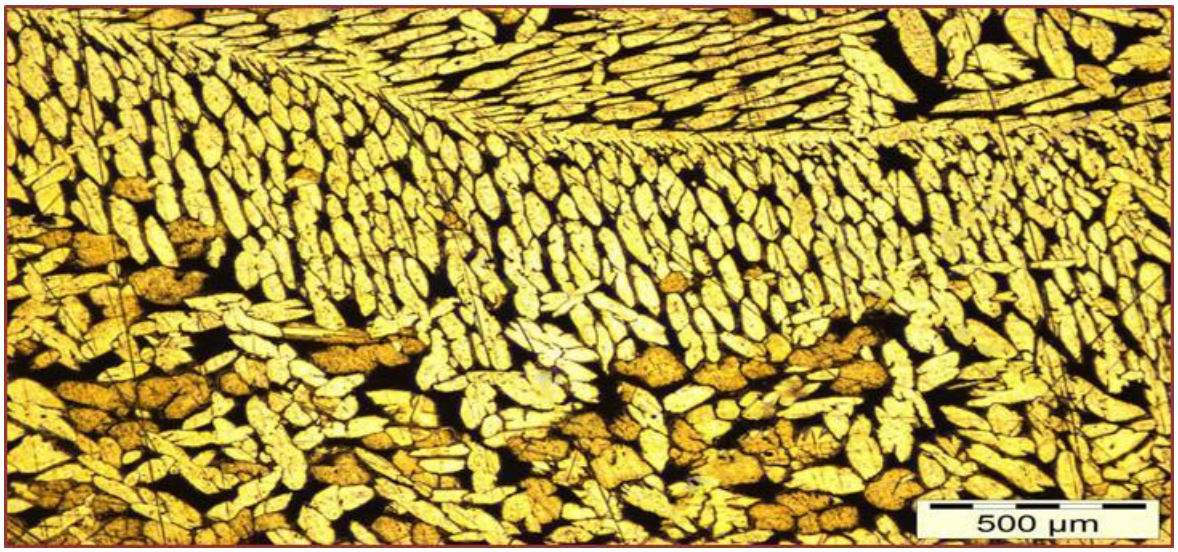
As ligas foram preparadas através da fusão de metais puros em um forno de indução sob atmosfera ambiente. O vazamento para a obtenção dos lingotes foi realizado em um molde de aço 1045, de seção retangular, com dimensões 94 mm de comprimento x 22 mm de largura x 59 mm. Em seguida, os lingotes foram cortados em pequenas placas quadradas com 21mm de aresta x 1,4mm de espessura. Os tratamentos térmicos aplicados foram de homogeneização a 850°C por 12h com resfriamento dentro do próprio forno, recozimento a 850°C por 30min e, por fim, têmpera em água à temperatura ambiente.

Para a realização dos ensaios de MO, todas as amotras passaram por lixamento em lixas de 80, 100, 200, 400, 600 e 1200. Na sequência, foi realizado um polimento com aluminas de granulometria de $1\mu m$ e $0{,}3\mu m$. As soluções de ataque para vizualização dos contornos de grão foram consultadas na norma ASTM E407 – 07 (2015) e serão indicadas nas respectivas micrografias. As imagens foram obtidas através de um microscópio óptico da Carl Zeiss - Axiotech 30 e do *software* de imagem Analysis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

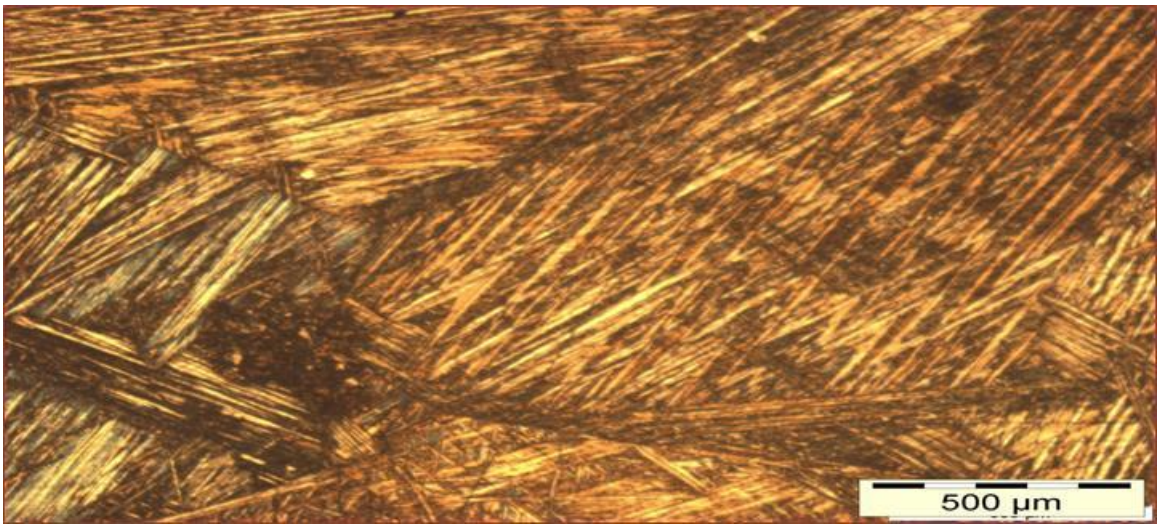
As ligas depois de fundidas e sem passar por nenhum tratamento térmico costumam ser chamadas de ligas brutas de fundição (LBF). A microscopia da LBF é utilizada como referência, de forma a identificar as fases presentes em temperatura ambiente, supressão de fases após homogeneização e verificar ocorrência de crescimento de grão. Na Figura 20 está uma LBF de composição Cu-8,14%Al-10,92Mn (% em peso).

Figura 20 – Estrutura dendrítica de uma liga bruta de fundição. Composição: Cu-8,14%al-10,92Mn (% em peso). Ataque: 2g $k_2Cr_2O_7$, 8ml H_2So_4, 2ml HCl e 100ml H_2O destilada



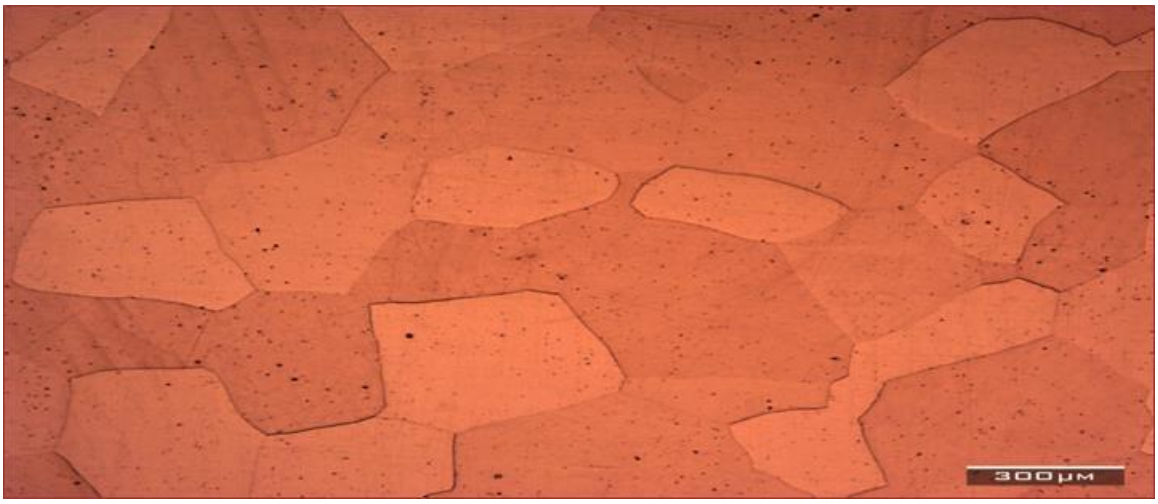
Após fundição, as ligas devem passar por tratamentos térmicos específicos como a homogeneização, que permite alcançar uma maior homogeneidade química, e a têmpera, para que seja possível obter alguma propriedade relacionada ao EMF. Em LMFs submetidas a têmpera, o ensaio metalográfico permite avaliar de forma qualitativa se a microestrutura da liga é referente à fase Austenita ou Martensita. Entretanto, ensaios complementares como DSC e DRX possibilitam a identificação da fase presente. Na Figura 21 é mostrada a liga Cu-11,8%Al-0.5%Mg (% em peso) após tratamentos de homogeneização e têmpera. Nota-se a presença da estrutura martensítica em forma de agulhas.

Figura 21 – Estrutura martensítica obtida após homogeneização e têmpera. Composição: Cu-11,8% Al-0,5%Mg (% em peso). Ataque: 5g $FeCl_3$, 16ml HCL e 60ml etanol



Na ausência de ripas ou agulhas na LMF, a liga se apresenta na fase Austenita, Figura 22. Como citado anteriormente, ensaios de DRX e DSC, associados com a microscopia óptica, auxiliam na identificação da fase existente.

Figura 22 - Estrutura austenítica obtida após homogeneização e têmpera. Composição: Cu-9,52% Al-12,09%Mn (% em peso). Ataque: 2g $K_2Cr_2O_7$, 8ml H_2SO_4, 2ml HCl e 100ml H_2O destilada



Outra forma de observação da estrutura martensítica nas LMFs se dá através do resfriamento da estrutura austenítica. Na Figura 23 está a evolução da microestrutura de uma liga austenítica submetida a resfriamento em nitrogênio líquido. Na Figura 23a, nota-se, em virtude do resfriamento induzido, a formação das primeiras placas de martensita, indicando o início da transformação martensítica. A transformação prossegue durante o processo de resfriamento da amostra, Figuras 4b e 4c, até atingir a temperatura de transformação final da martensita (M_f) ilustrada na Figura 23d. Na Figura 24, a martensita apresenta-se sob a forma de placas e agulhas.

Figura 23 - Evolução da transformação martensítica numa liga austenítica resfriada em N_2. Composição: Cu-8,14% Al-10,92%Mn (% em peso). Sem ataque

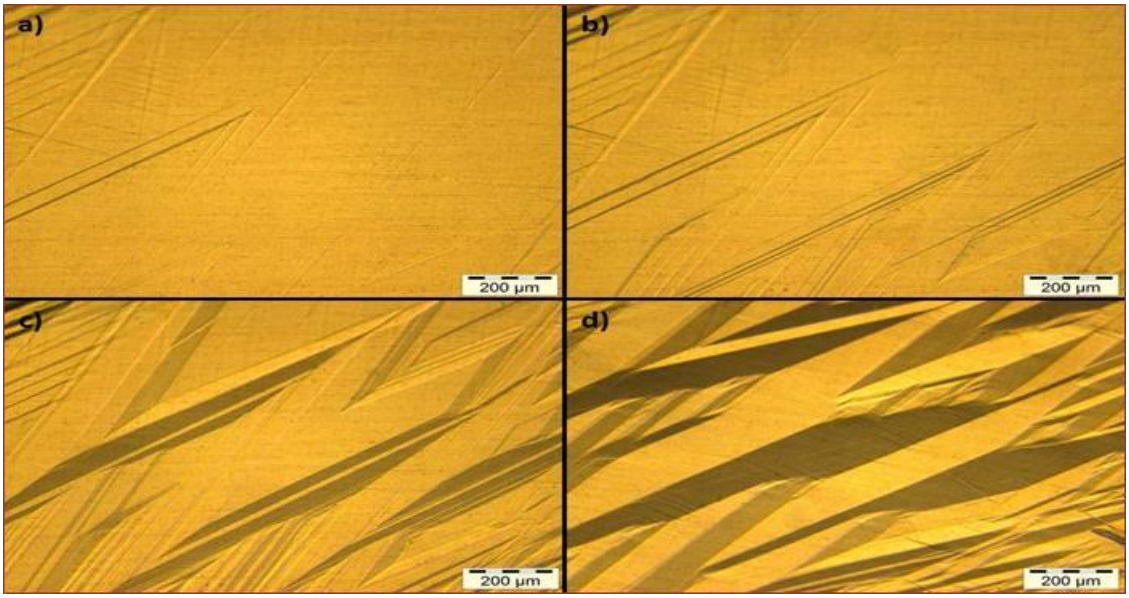
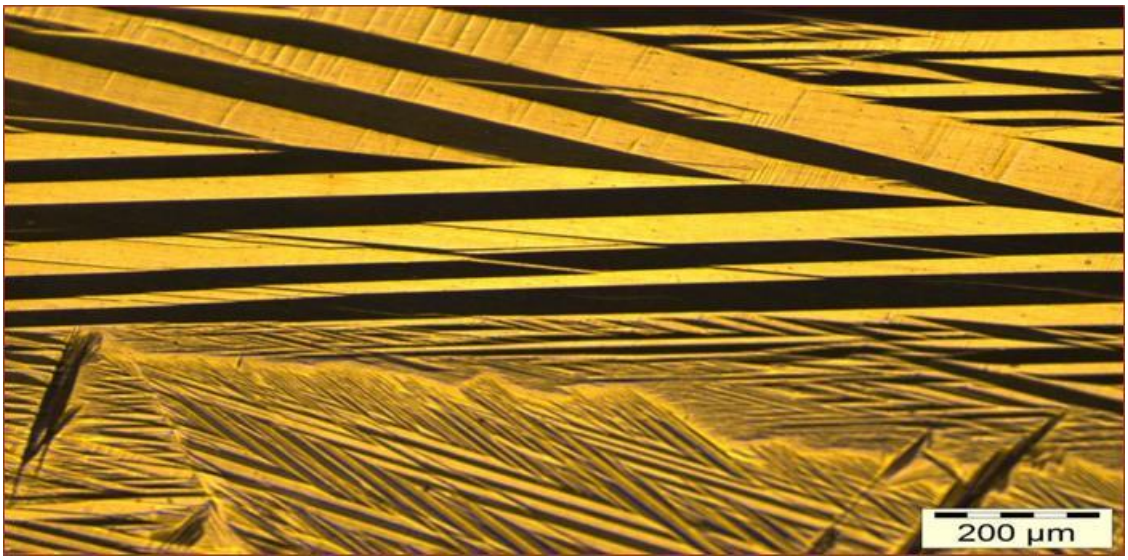
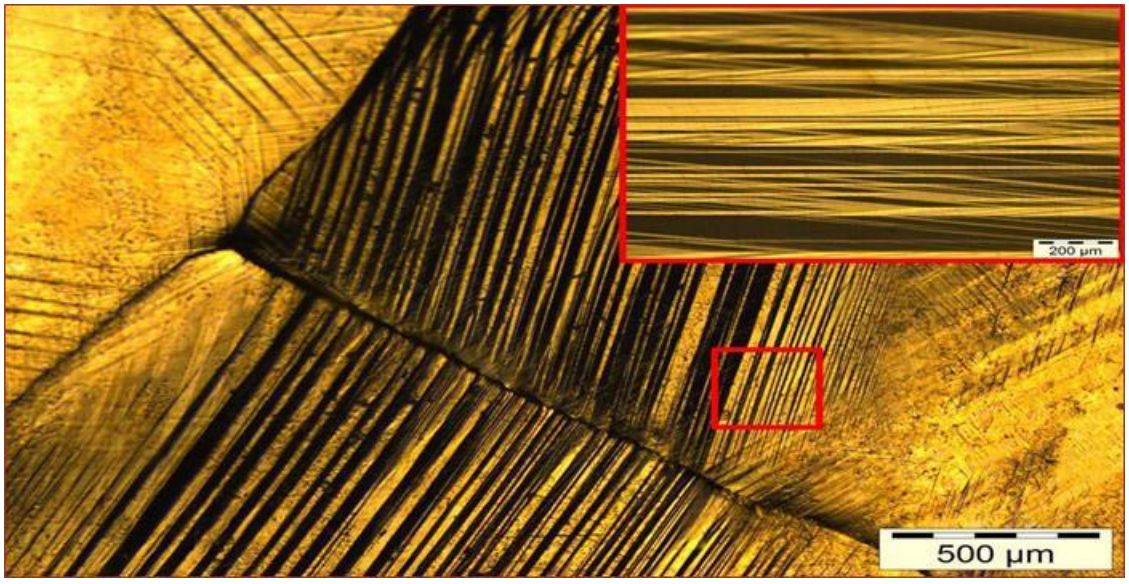


Figura 24 - Martensita sob a forma de placas e agulhas. Composição: Cu-8,14% Al-10,92% Mn (% em peso). Sem ataque



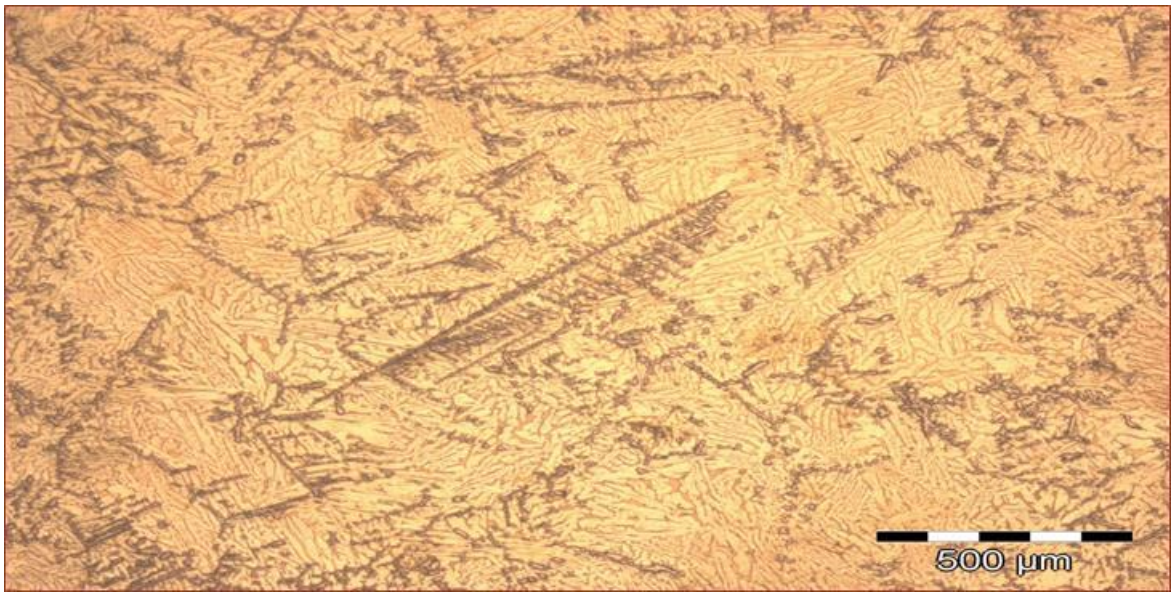
A fase martensítica pode também ser observada quando as LMFs são submetidas a um determinado nível de tensão, provocando assim uma transformação de fase induzida por tensão (ALANEME e OKOTETE, 2016, p. 4). A fase gerada é a martensita induzida por tensão, Figura 25.

Figura 25 – Martensita induzida por tensão em uma liga tracionada. Composição: Cu-8,14% Al-10,92% Mn (% em peso). Sem ataque



Em algumas LMFs são adicionados elementos de liga a fim de melhorar as propriedades mecânicas e de memória de forma do material. Alguns elementos apresentam boa solubilidade na matriz, enquanto a baixa solubilidade de outros promove a formação de precipitados. Esses precipitados, de forma geral, podem ter influência nas temperaturas de transformação, na capacidade de trabalho a frio (SUTOU, KAINUMA e ISHIDA, 1999, p. 2) e no refino de grão das ligas (YANG, WANG, *et al.*, 2016). Na Figura 26 está a liga Cu-8,14%Al-10,92%Mn-4,00%Nb (% em peso) com o nióbio precipitado devido a sua baixa solubilidade na matriz.

Figura 26 - Liga Cu-8,14% Al-10,92%Mn-4,00% Nb (% em peso) com precipitados de Nb. Ataque: 2g $K_2Cr_2O_7$, 8ml H_2SO_4, 2ml HCl e 100ml H_2O destilada



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com desígnios de melhor elucidar os fenômenos relacionados ao efeito memória de forma, foram apresentadas microestruturas variadas referentes a LMFs do sistema Cu-Al, desde microestruturas de liga em estado bruto de fundição até diferentes microestruturas resultantes da transformação martensítica, seja esta por resfriamento, temperatura ou solicitação mecânica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pela estrutura fornecida para a execução do trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] ALANEME, K. K.; OKOTETE, E. A. Reconciling viability and cost-effective shape memory alloy options – A review of copper and iron based shape memory metallic systems. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016.

[2] ASTM. ASTM E407 – 07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. American Society for Testing and Materials. [S.l.]. 2015.

[3] BARBARINO, S.; FLORES, E. I. S; AJAJ, R. M.; DAYYANI, I; FRISWELL, M. I. A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. Smart Mater. Struct. 23, 2014.

[4] BOULLAY, P.; SCHRYVERS, D. Bending martensite needles in Ni65Al35 investigated by two-dimensional elasticity and high-resolution transmission electron microscopy. PHYSICAL REVIEW B 64, 2001.

[5] CALLISTER JR, G.; WILLIAM, D.; RETHWISCH, D. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 9. ed. [S.l.]: Grupo GEN, 2016

[6] COLPAERT, H. In: _____ Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. Cap. 5.

[7] JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials and Design 56, 2014.

[8] LA ROCA, P; ISOLA, L.; VERMAUT, PH; MALARRÍA, J. β-grain size effects on the 18R-martensite microstructure in Cu-based SMA. Procedia Materials Science 8, 2015. 1133 – 1139.

[9] LIU, J.-L.; HUANG, H.-Y.; XIE, J.-X. Superelastic anisotropy characteristics of columnar-grained Cu–Al–Mn shape memory alloys and its potential applications. Materials and Design 85, 2015. 211-220.

[10] MARKOPOULOS, A. P.; PRESSAS, I. S.; MANOLAKOS, D. E. Manufacturing processes of shape memory alloys. In: _____ Materials Forming and Machining. [S.l.]: [s.n.], 2016. Cap. 7.

[11] SONG, G.; MA, N.; LI, H. Applications of shape memory alloys in civil structures. Engineering Structures 28, 2006.

[12] SUTOU, Y.; KAINUMA, R.; ISHIDA, K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys. Materials Science and Engineering A273–275, 1999. 375–379.

[13] WANG, SHAN-LING; YANG, QIN; LI, XIAO-LAN; PENG, HUA-BEI; WEN, YU-HUA. Influence of recovery heating rate on shape memory effect in up-quenched Cu-Al-Mn alloy. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 24, 2014. 3196-3200.

[14] YANG, J; WANG, Q.Z; YIN, F.X; CUI, C.X; JI, P.G; LI, B. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy. Materials Science & Engineering A 664, 2016.

[15] YANG, SHUIYUAN; ZHANG, FAN; WU, JIALIN; LU, YONG; SHI, ZHAN; WANG, CUIPING; LIU, XINGJUN. Superelasticity and shape memory effect in Cu–Al–Mn–V shape memory alloys. Materials and Design 115, 2017.

[16] YANG, SHUIYUAN; ZHANG, JIXUN; CHI, MENGYUAN; WEN, YUHUA; CHEN, XINREN; WANG, CUIPING; LIU, XINGJUN. Low-cost Cu-based shape memory single crystals obtained by abnormal grain growth showing excellent superelasticity. Materialia, 2019.

Capítulo 16

Efeito do Ti-B na microestrutura e na dureza de uma liga CuAlMn passível de efeito memória de forma

Carlos Cássio de Alcântara
Rodinei Medeiros Gomes
Daniel Nicolau Lima Alves

Resumo: O presente trabalho pretende relacionar a influência do Ti-B na microestrutura e na dureza de uma liga do sistema Cu-Al-Mn passível do efeito memória de forma. Inicialmente, foram elaborados dois tipos ligas: I - Cu-Al-Mn e II - Cu-Al-Mn-$(Ti\text{-}B)_x$ com concentrações x= 0,1%, 0,3% e 0,5% (% em peso). Nas ligas com Ti-B houve o aparecimento de precipitados. A quantidade destes precipitados aumenta com o incremento do teor de Ti-B. Os dois tipos de ligas apresentaram a transformação martensítica quando resfriadas. Desse resultado conclui-se que as ligas são passíveis do efeito memória de forma. O Ti-B atua como refinador diminuindo o diâmetro médio de grão. Os valores de dureza encontrados mostraram-se inversamente proporcionais ao diâmetro médio de grão e diretamente proporcionais ao teor de Ti-B.

Palavras-chave: Memória de forma, Dureza, Refino de grão, Titânio, Boro.

1. INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMFs) do sistema Cu-Al-Mn têm atraído a atenção de vários pesquisadores nos últimos anos devido ao seu baixo custo de fabricação (MIELCZAREK, RIEHEMANN, *et al.*, 2008, p. 146), facilidade de processamento (DASGUPTA, JAIN, *et al.*, 2015, p. 60) e altas condutividades elétrica e térmica (OTSUKA e WAYMAN, 1998, p. 97). Entretanto, as trincas originadas nas junções triplas das ligas desse sistema diminuem significativamente propriedades como a plasticidade, a superelasticidade e a fadiga (MIYAZAKI, KAWAI e OTSUKA, 1982; MIYAZAKI e OTSUKA, 1989; UELAND e SCHUH, 2013).

Alternativas potenciais para contornar tais problemas são baseadas em processos e técnicas que possibilitam a modificação da morfologia dos grãos. Diversos pesquisadores têm utilizado a técnica de refino de grão por adição de elementos de liga na melhoria das propriedades mecânicas de LMFs: Sutou, Omori, *et al.* (2005, p. 4132) aumentaram a taxa de encruamento de uma liga CuAlMn através da redução de grão, Sampath (2006, p. 794) obteve o aumento do efeito memória de forma e alta dureza em LMFs com grãos refinados e Yang, Wang, *et al.* (2016, p. 219-220) melhoraram a capacidade de amortecimento através do refino de grão de ligas CuAlMn.

Dessa forma, o presente trabalho pretende relacionar a influência da adição de Ti-B na microestrutura e na dureza de uma liga do sistema Cu-Al-Mn passível do efeito memória de forma.

2. METODOLOGIA

Dois tipos ligas: I - Cu-Al-Mn e II - Cu-Al-Mn-(Ti-B)x, com concentrações x= 0,1%, 0.3% e 0,5% (% em peso), foram preparadas através da fusão de metais puros e de uma liga mãe Al-5%Ti-1%B (% em peso) em um forno de indução sob atmosfera ambiente. As ligas foram denominadas como SR (sem Ti-B) e R0.1, R0.3 e R0.5 de acordo com o conteúdo de Ti-B adicionado. A composição nominal está mostrada na Tabela 14. Cada liga, com cerca de 850g, foi homogeneizada a 850°C por 12h e resfriada dentro do próprio forno. Na sequência, as ligas foram cortadas em pequenas placas quadradas com 21mm de aresta x 1,4mm de espessura e então submetidas a recozimento a 850°C por 30min, seguido de têmpera em água. As respectivas composições químicas foram determinadas através da análise pontual em 7 (sete) pontos da superfície por espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A microestrutura à temperatura ambiente e sob resfriamento foi analisada através de microscopia óptica (MO). Para a visualização dos contornos de grão foi utilizado o método de ataque por esfregação, onde uma porção de algodão foi imersa em uma solução de 2 g $K_2Cr_2O_7$, 8 ml H_2SO_4, 2 ml HCl e 100 ml H_2O destilada e esfregada contra a superfície das amostras. O diâmetro médio de grão (DMG) foi obtido através do comprimento médio do intercepto pelo processo de Heyn, descrito pela Asociación Mercosur de Normalización (2001, p. 7-10), a partir das micrografias à temperatura ambiente. A dureza das ligas foi obtida através do ensaio Rockwell D (HRD), seguindo a norma da American Society For Testing and Materials - ASTM: E18 – 17 (2017).

Tabela 14 - Composição nominal das ligas (% em peso)

Liga	Cu	Al	Mn	Ti	B
SR	Balanço	9,520	12,090	-	-
R0.1	Balanço	9,520	12,090	0,083	0,017
R0.3	Balanço	9,520	12,090	0,250	0,050
R0.5	Balanço	9,520	12,090	0,417	0,083

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química das ligas obtida através análise pontual por EDS está mostrada na Tabela 15.

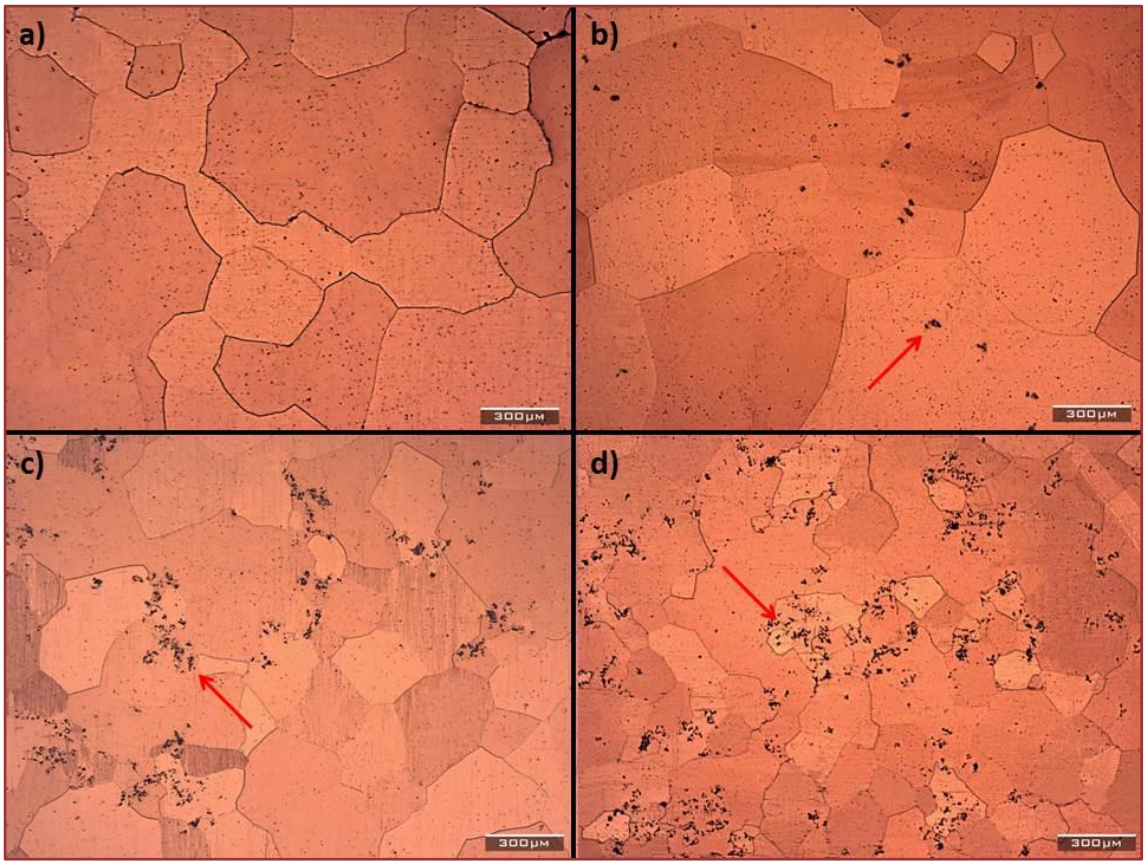
Tabela 15 - Composição química das ligas obtidas por EDS

Liga	Cu	Al	Mn	Ti	B
SR	Balanço	9,4	12,0	-	-
R0.1	Balanço	9,0	11,6	-	-
R0.3	Balanço	9,2	11,7	-	-
R0.5	Balanço	9,2	11,9	-	-

A análise pontual por EDS não conseguiu detectar a presença dos elementos Ti-B. A composição mensurada através de EDS mostra divergência em relação à composição nominal. O desvio entre a composição nominal e a mesurada dos elementos Al e Mn pode ser atribuído a perdas decorrentes do processo de fusão da liga (JAIN, HUSSAIN, *et al.*, 2016, p. 1290).

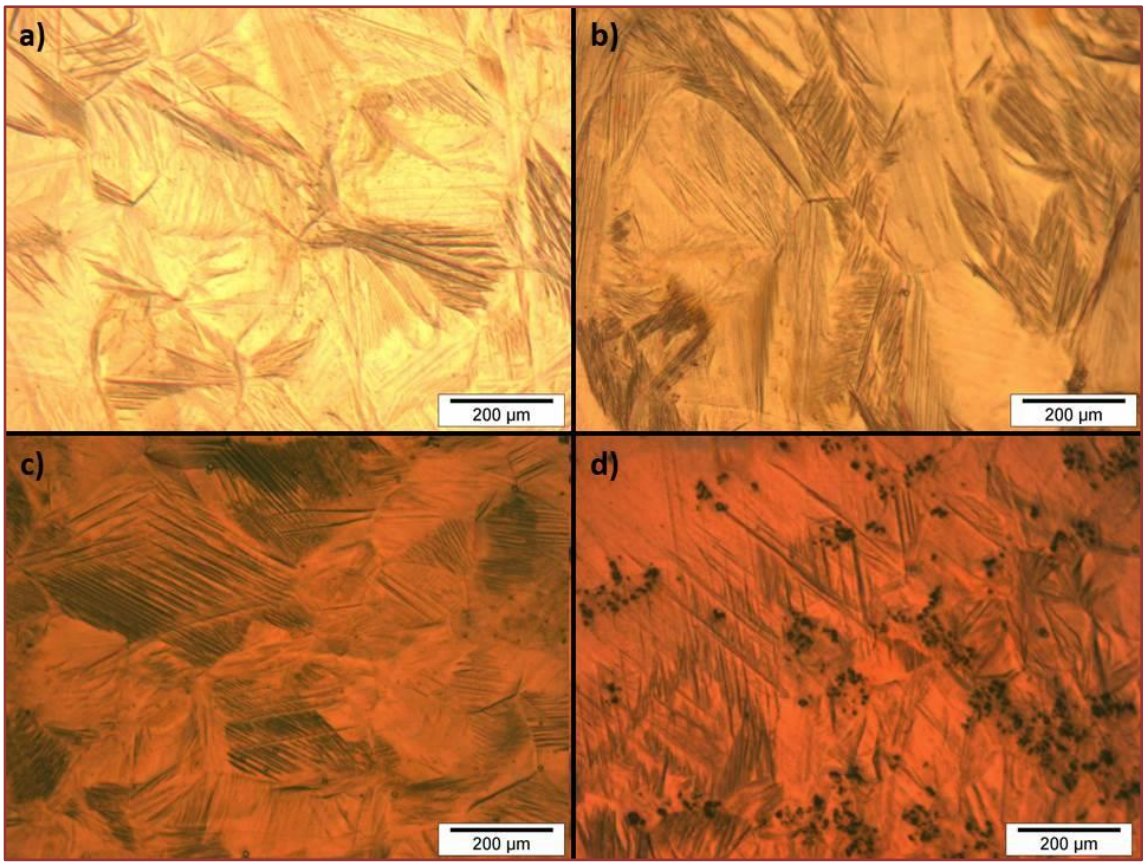
Apesar dos elementos Ti-B não terem sido identificados pelo EDS, através do ensaio de MO foi possível detectar precipitados possivelmente ligados a estes elementos. Na Figura 27 são apresentadas as microestruturas das ligas com a presença dos precipitados à temperatura ambiente. Comparando a liga SR com as demais, nota-se a ausência de precipitados. Tal liga não possui a adição de Ti-B em sua composição. Ao contrário, as ligas R0.1, R0.3 e R0.5 têm a adição de Ti-B e, consequentemente, apresentaram um volume de precipitados proporcional à quantidade de Ti-B adicionada. Dessa forma, pode-se pressupor que esses precipitados estejam relacionados, no mínimo, ao Ti, uma vez que sua baixa solubilidade na matriz β promove a formação de outra fase (SUTOU, KAINUMA e ISHIDA, 1999, p. 376; MALLIK e SAMPATH, 2009, p. 158).

Figura 27 - Microestrutura das ligas a)SR; b)R0.1; c)R0.3; e d)R0.5. As setas indicam a formação dos precipitados



No intuito de descobrir, de forma qualitativa, a existência do efeito memória de forma, as ligas foram resfriadas em nitrogênio líquido até alcançarem o equilíbrio térmico e foram capturadas imagens da sua microestrutura. Na Figura 28 é possível perceber as agulhas características da transformação martensítica em todas as ligas. Dessa forma, pode-se concluir que o material é passível de exibir o efeito memória de forma, uma vez que exibe as agulhas provenientes da fase martensítica quando resfriado e, em temperatura ambiente, ocorre a transformação martensítica reversa (martensita - austenita) com o desaparecimento dessas agulhas.

Figura 28 - Microestrutura das ligas a)SR; b)R0.1; c)R0.3; e d)R0.5 submetidas a resfriamento



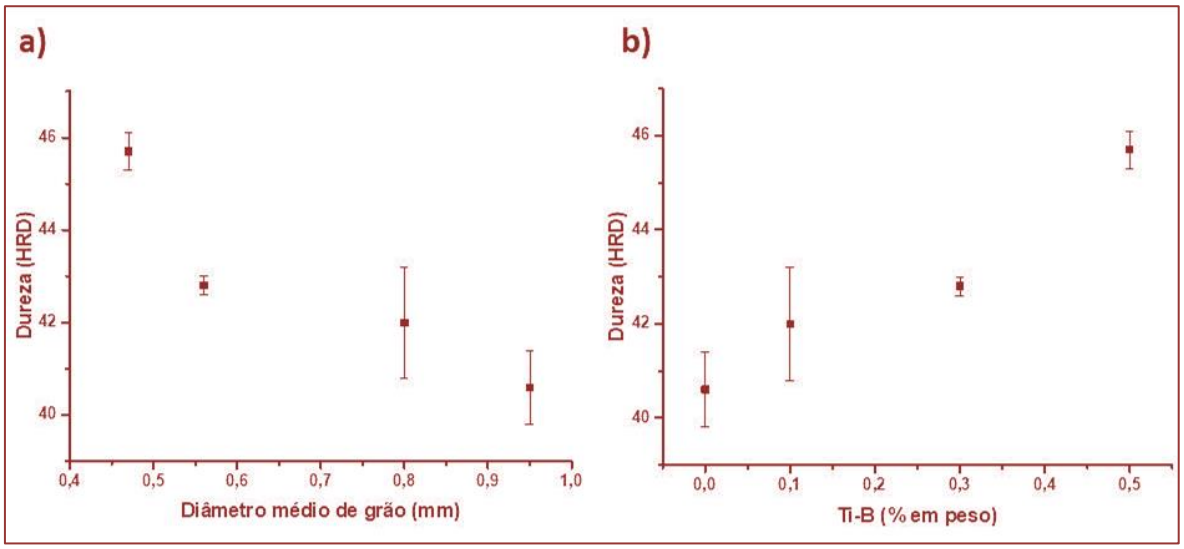
Em relação ao DMG, observa-se que o tamanho de grão diminui com maiores quantidades de Ti-B. Os resultados de DMG mensurados estão dispostos na Tabela 3. A adição de Ti-B promoveu a diminuição de aproximadamente 16%, 41% e 51% das ligas R0.1, R0.3 e R0.5, respectivamente, em relação à liga SR. Essa diminuição pode ser explicada pela capacidade de refino do Ti decorrente do efeito combinado dos seus átomos em solução sólida e, adicionalmente, da inibição do crescimento de grãos promovido pela presença de partículas de segunda fase (ELST, VAN HUMBEECK e DELAEY, 1988, p. 647). Ademais, o boro também atua como elemento refinador (VAN HUMBEECK, 1997, p. 7; SAMPATH e MALLIK, 2009. p. 5).

Tabela 16 - Diâmetro médio de grão das ligas

Liga	Diâmetro médio de grão (mm)
SR	0,95
R0.1	0,80
R0.3	0,56
R0.5	0,47

Na Figura 29 encontram-se os valores de dureza obtidos em cada liga. Observa-se que a dureza tem um comportamento inversamente proporcional ao DMG e diretamente proporcional à quantidade de Ti-B, tendo a liga SR obtido a dureza 40,6 HRD, seguida por R0.1 com 42,0 HRD, R0.3 com 42,8 HRD e a liga R0.5 alcançando 45,7 HRD. A relação da dureza com o DMG e com o teor de Ti-B está baseada no refino de grão das ligas. Grãos refinados promovem uma maior dureza no material (HANSEN, 2004, p. 801-802; SAMPATH, 2006, p. 794). E, como a adição de Ti-B funciona como refinador, um aumento nos teores destes elementos promoverá um incremento nos valores de dureza da liga.

Figura 29 - Valores de dureza em relação a a) diâmetro médio de grão; b) % em peso de Ti-B



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram elaborados dois tipos ligas: I-Cu-Al-Mn e II-Cu-Al-Mn-(Ti-B)x com concentrações x= 0,1%, 0.3% e 0,5% (% em peso). Sua microestrutura, presença de transformação martensítica, diâmetro médio de grão e dureza foram estudadas. Os resultados obtidos levam às seguintes conclusões:

1) Devido à baixa solubilidade do Ti na matriz β, as ligas R0.1, R0.3 e R.5 apresentaram um volume de precipitados proporcional à quantidade de Ti-B adicionada.

2) Todas as ligas, quando resfriadas, apresentaram agulhas características da transformação martensítica. Dessa forma, pode-se concluir que o material é passível de exibir o efeito memória de forma.

3) O Ti-B atua como refinador de grãos diminuindo o diâmetro médio de grão.

4) O valor de dureza é inversamente proporcional ao diâmetro médio de grão e diretamente proporcional ao teor de Ti-B.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e a Universidade Federal da Paraíba (UFPB) pela estrutura fornecida para a execução do trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E18 - 17: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. ASTM. [S.l.]. 2017.

[2] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. NORMA MERCOSUR NM 241:2001 - Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos: Procedimento. ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. [S.l.]. 2001.

[3] DASGUPTA, R.; JAIN, A. K.; KUMAR, P.; HUSSAIN, S.; PANDEY, A. Role of alloying additions on the properties of Cu–Al–Mn shape memory alloys. Journal of Alloys and Compounds, 2015.

[4] ELST, R.; VAN HUMBEECK, J.; DELAEY, L. Grain refinement of Cu–Zn–Al and Cu–Al–Ni by Ti addition. Materials Science and Technology Vol.4, 1988.

[5] HANSEN, N. Hall–Petch relation and boundary strengthening. Scripta Materialia 51, 2004.

[6] JAIN, A. K.R; HUSSAIN, S.; KUMAR, P.; PANDEY, A. Effect of Varying Al/Mn Ratio on Phase Transformation in Cu–Al–Mn Shape Memory Alloys. Trans Indian Inst Met, 2016.

[7] MALLIK, U. S.; SAMPATH, V. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. Journal of Alloys and Compounds 469, 2009.

[8] MIELCZAREK, A.; RIEHEMANN, W.; VOGELGESANG, S.; TONN, B. Mechanical and fatigue properties of Cu - Al - Mn shape memory alloys with influence of mechanical cycling on amplitude dependence of internal friction at room temperature. Solid State Phenomena, 2008.

[9] MIYAZAKI, S.; KAWAI, T.; OTSUKA, K. ON THE ORIGIN OF INTERGRANULAR FRACTURE IN β PHASE SHAPE MEMORY ALLOYS, 1982.

[10] MIYAZAKI, S.; OTSUKA, K. Development of ShapeMemory Alloys. ISI JInternational, 1989.

[11] OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. Shape Memory Materials. [S.l.]: [s.n.], 1998.

[12] SAMPATH, V. Improvement of Shape-Memory Characteristics and Mechanical Properties of Copper–Zinc–Aluminum Shape-Memory Alloy with Low Aluminum Content by Grain Refinement. Materials and Manufacturing Processes 21, 2006.

[13] SAMPATH, V.; MALLIK, U. S. Influence of minor additions of boron and zirconium on shape memory properties and grain refinement of a Cu-Al-Mn shape memory alloy. European Symposium on Martensitic Transformations, 2009.

[14] SUTOU, Y.; KAINUMA, R.; ISHIDA, K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys. Materials Science and Engineering A 273–275, 1999.

[15] SUTOU, Y.; OMORI, T.; YAMAUCHI, K.; ONO, N.; KAINUMA, R.; ISHIDA, K.. Effect of grain size and texture on pseudoelasticity in Cu–Al–Mn-based shape memory wire. Acta Materialia 53, 2005.

[16] UELAND, S. M.; SCHUH, C. A. Grain boundary and triple junction constraints during martensitic transformation in shape memory alloys. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 114, 2013.

[17] VAN HUMBEECK, J. Shape Memory Materials : State of the Art and Requirements for Future Applications. Journal de Physique IV, 1997.

[18] YANG, J; WANG, Q.Z; YIN, F.X; CUI, C.X; JI, P.G; LI, B. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy. Materials Science & Engineering A 664, 2016.

Capítulo 17

Software solution for ultra-hard metal alloy design

Raphael Basilio Pires Nonato
Thomaz Augusto Guisard Restivo

Abstract: Ultra-hard metal alloys (UHMAs) are mainly required when wear resistance is the most important requirement in a product. In view of this, researchers established some technical parameters to predict the stability of the resulting UHMA and facilitate the design process of these alloys. In this research, ten parameters were selected to theoretically guarantee that the UHMA formed is stable. Associated with some of these parameters, there are criteria from which the stability of the alloy is evaluated. In order to speed up the UHMA design process while simultaneously calculating the parameters involved and providing the statuses of the associated criteria, a computer program was coded in Microsoft Visual Basic 6.0®. By providing the required information, this application provides the mass of each chemical element to compose the mass necessary for the formation of a UHMA, in addition to calculating the parameter values and whether each established criterion is met. The program results were validated through the comparison with the analytical results of a scientific article, obtaining a maximum relative error of 1.923%. The main contributions of this computer program are related to the organization of criteria in a single application (simplifying the evaluation process), faster operation and portability (as it can be installed on any Windows®-based device).

Keywords: Ultra-hard metal alloys; Metal alloy design; Metal alloy; Computer program development; Computer programming.

1. INTRODUCTION

A wide range of materials resulted from researches performed all over the world in order to solve the most distinct problems. Notably, when the wear resistance enhancement of a part is an improvement requirement, the automatic request is for tougher and harder materials. In view of this, the most widely employed materials to solve this problem are generally the ultra-hard metal alloys (UHMAs), e.g. special steels and superalloys, and the metallic-ceramic composites (e.g. carburized carbides or hard metal).

In this scenario, the mechanical properties of pure metals can be significantly improved by producing alloys with metallic and/or non-metallic elements (Razuan *et al*., 2013). The conception of these conventional alloys encompasses a maximum of one or two main elements (Shun *et al*., 2012). In addition, a distinct solution addresses the multi-component alloys, which have three or more main elements. Despite their use in a great variety of situations and the fact that they can represent the solution required in many situations, the possible formation of intermetallic compounds associated with complex microstructures may provide undesired physical behavior and inadequate magnitudes of mechanical properties.

Regarding hardness, the conventional metal alloys and steels may reach magnitudes of approximately 1100 *HV* (Vickers' hardness, kgf/mm^2), viz. the M40-series high-speed steel (HSS) (Dennis, 1993). Carburized, nitrided, and boronized alloys can reach up to 1900 *HV* (Klaus, 1993). Nonetheless, the currently available alloys frequently present a considerable degree of ceramic phases after heat treated, which gives them a brittleness character.

In order to reduce the presence of these unwanted microstructures and, consequently, their associated properties, a solution has been widely applied throughout last decades. The so-called high-entropy alloys (HEAs) then emerged, which denomination refers to their high entropic effects in solidification process, hence promoting the obtainment of simple solid solutions, in opposition to the formation of complex phases. The design of HEAs stands on at least five main elements, which concentrations range between 5 and 35% in molar fraction.

Although HEAs minimized the formation of intermetallic components, there is still the opportunity for improvement in what refers to hardness (wear resistance). In this context, the recent finding of diamoy alloys can be one of the breakthroughs of this paradigm (Restivo and Restivo, 2021). These alloys, yet under development, have six to nine different metallic elements at the cubic lattice positions. On both laboratory and industrial scales, the values of hardness are the highest ever registered when compared to the other metallic alloys, even surpassing those of ceramic oxides. For comparison purposes: (a) without heat treatment, diamoy alloys may reach up to 1420 *HV* (value higher than that presented by the conventional metal alloys, achieving around 1100 *HV*); (b) when heat treated, diamoy alloys reach the baseline of 2500 *HV* (value higher than carburized, nitrided, and boronized alloys, of 1900 *HV*).

In parallel to an ever-growing number of findings related to ultra-hard metal alloys (UHMAs), the set of criteria to be fulfilled to produce stable solid solutions is frequently being revised. In addition, each combination of elements may imply in a unique set of minimum criteria to be attended. Consequently, there may be relative difficulty in recognizing and adopting a certain set of criteria to produce and possibly assure the required solid solution stability. The method to design a multi-component alloy by using a set of criteria is denominated parametric approach (Tazuddin *et al*., 2016), (Tazuddin *et al*., 2017). Besides that, two other approaches can also be adopted: calculation phase diagrams (CALPHAD) (Zhang *et al*., 2012) (Zhang *et al*., 2014), and molecular dynamic (MD) simulations (Xie *et al*., 2013), (Gao and Alman, 2013).

Therefore, this paper presents a software coded in Microsoft Visual Basic 6.0® based on the parametric approach of UHMAs design. This computer program provides the values of ten parameters and the statuses of four criteria associated with four of these parameters to indicate the feasibility of forming a stable multi-component alloy. Besides that result, under the input of some information about the intended solid solution, the software also provides the mass of each chemical element to form the required alloy. In the branch of parametric approach, the main contributions of the developed software reffer to: (a) providing a tool which contains some of the most used parameters to constitute a multi-component metallic alloy, thus simplifying the related evaluation process; (b) speeding up the design process by just a few user-machine interactions; (c) turning this into a portable tool, which can be accessed or installed in any Windows®-based device.

2. BASIC DESCRIPTIVE PARAMETERS TO FORM A SOLID SOLUTION

According to the parametric approach (Tazuddin *et al.*, 2017), when a metallic multi-component alloy is intended to be processed, there are several fundamental descriptors of the referred solid solution (eventually it may also result in intermetallic-containing alloys, or metallic glasses). Among all the available parameters, ten are described in this work. There are also four criteria, each associated with one different parameter in order to provide four distinct statuses. Therefore, the set of descriptive parameters and criteria are addressed here in order to predict the solid solution stability. These parameters are presented in the following items:

a) Chromium equivalent coefficient, Cr_{eq}: it is calculated from the ferrite-forming elements to measure the formation of δ-ferrite (Eq. (1)), which, in turn, is known to reduce the notch toughness where fatigue phenomenon prevails (Ryu and Yu, 1998). The higher the chromium equivalent coefficient, the more it approaches to a body-centered cubic (BCC) structure, thus increasing the hardness (Restivo and Restivo, 2021), where each chemical symbol represents the respective weight percentage in the solid solution.

$$Cr_{eq} = Cr + 0.8\,Si + 2\,Mo + W + 4V + 2\,Nb + 1.7\,Al + 60\,B + 2\,Ti + Ta + \\ -2\,Ni - 0.4\,Mn - 0.6\,Co - 0.6\,Cu - 20\,N - 20\,C. \quad (1)$$

b) Atomic radii difference, $\Delta r(\%)$: described as the first rule of Hume-Rothery, it states that the solid solution effectively occurs when the difference between atomic radii (largest and smallest) of the chemical elements involved is lower than 15% (Wang *et al.*, 2019), as per Eq. (2), where r_S and r_M are, respectively, the substitutional and the matrix atomic radii of the solid solution.

$$\Delta r(\%) = \frac{|r_S - r_M|}{r_M} 100. \quad (2)$$

c) Mean atomic radius, $\tilde{r}$: the weighted average of atomic radii of the chemical elements involved is expressed mathematically by Eq. (3) (Singh *et al.*, 2014), in which f_i and r_i are, respectively, the molar fraction and the radius of the i-th element, and n is the number of elements used in the alloy design.

$$\tilde{r} = \sum_{i=1}^{n} f_i\, r_i\,. \quad (3)$$

d) Atomic size difference, δ: the poli-dispersion of atomic radii affects the atomic packing and is defined by the mean square deviation of the atomic radii of the involved elements, which is expressed by Eq. (4). In terms of this parameter, the solid solution tends to be stable if $1.1 \leq \delta \leq 6.6\%$, excluding some specific situations (Yang and Zhang, 2012). It also can be complementary understood as a measure of strain referred to an ideal lattice because if the bonds are distorted at a certain degree, local strains occur (Singh *et al.*, 2014):

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} f_i \left(\frac{1 - r_i}{\tilde{r}}\right)^2}\,. \quad (4)$$

e) Topological discrepancy, γ: given by Eq. (5), it quantifies the effects of smallest and largest atoms of the solid solution (Hu *et al.*, 2017), where r_{MAX} and r_{MIN} are, respectively, the largest and smallest radii among the involved chemical elements. In this case, the criteria to be observed is that the calculated γ should be smaller than 1.175.

$$\gamma = \frac{1-\sqrt{\frac{(r_{MAX}+\tilde{r})^2-\tilde{r}^2}{(r_{MAX}+\tilde{r})^2}}}{1-\sqrt{\frac{(r_{MIN}+\tilde{r})^2-\tilde{r}^2}{(r_{MIN}+\tilde{r})^2}}}. \quad (5)$$

f) Mean Valence Electron Concentration, $\tilde{V}$: expressed by Eq. (6), it is the average periodic table group number, in which BCC structure is stable for $\tilde{V} < 6.87$; for $\tilde{V} \geq 8$, FCC structure is stable; otherwise, FCC predominantly occurs, but BCC may occur at some situations. It depends on the circumstances of each alloy configuration (Guo *et al.*, 2011), in which V_i is the value electron concentration of the i-th element involved in the solid solution.

$$\tilde{V} = \sum_{i=1}^{n} f_i V_i . \quad (6)$$

g) Electronegativity difference, $\Delta\chi$: it is the difference between the largest and smallest electronegativities of the involved chemical elements, which affects the enthalpy of mixing, influencing the phase separation and new phase formation (Fang *et al.*, 2003). The appearance of intermetallic compounds can be minimized or even avoided for small values of electronegativity difference. The parameter is given by Eq. (7), where χ_i denotes the Pauling electronegativity of the i-th element, and $\tilde{\chi}$ is the mean electronegativity among solid solution elements.

$$\Delta\chi = \sqrt{\sum_1^n f_i (\chi_i - \tilde{\chi})^2} \quad (7)$$

h) Molar-averaged melting point, $\tilde{T}$: weighted average of the melting points of the constituents, given by Eq. (8), where T_i is the melting point of the i-th element of the solution (Singh *et al.*, 2014).

$$\tilde{T} = \sum_{i=1}^{n} f_i T_i . \quad (8)$$

i) Mean density, $\tilde{\rho}$: weighted average of the densities of the materials involved, where ρ_i is the density of the *i*-th element of the solution, as per Eq. (9):

$$\tilde{\rho} = \sum_{i=1}^{n} f_i \rho_i . \quad (9)$$

j) Mean bulk modulus, $\tilde{K}$: presented in Eq. (10), it can be obtained by calculating the weighted average of the bulk moduli of the involved chemical elements. The bulk modulus is defined as the resistance of a material to volume compression subjected to hydrostatic pressure. Therefore, it is commonly applied to evaluate the incompressibility of a material. (Huang and Vitos, 2019). Moreover, the relatively strong dependence of the bulk modulus on the atomic radius is evidenced in (Wu *et al.*, 2015),

$$\tilde{K} = \sum_{i=1}^{n} f_i K_i , \quad (10)$$

where K_i, which is given by Eq. (11), is the bulk modulus of the i-th element of the solid solution, in which $(V_0)_i$ denotes the initial volume of the i-th element, and *P* is the applied pressure:

$$K_i = -(V_0)_i \frac{dP}{d(V_0)_i}, \quad (11)$$

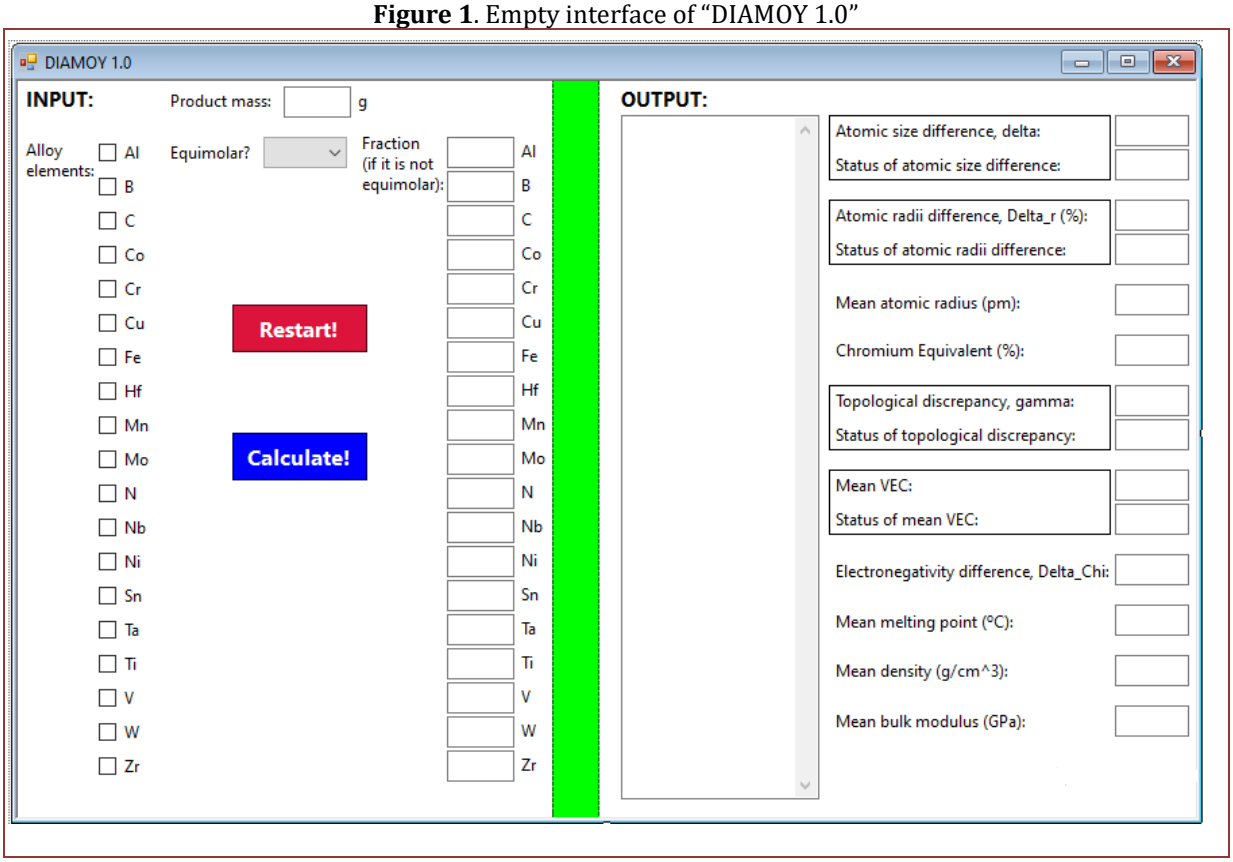
3. SOFTWARE DEVELOPED FOR UHMA DESIGN

In order to provide a tool to gather a few of the most important parameters to check the initial feasibility of UHMA, a software named "DIAMOY 1.0" was developed and here introduced. In addition to the calculation of the ten described parameters, four criteria are provided by their verification statuses. Furthermore, the computer program gives the mass of each chemical element involved in the solid solution design. The referred software was developed in Microsoft Visual Studio 10.0® by means of emulating the ambient of Microsoft Visual Basic 6.0®.

The conception of this application aims at easing the evaluation process to form a metal alloy because besides functioning as an intrinsic checklist, it intends to speed up the alloy design process. Despite all this, there is no assurance that, if all these criteria are strictly attended, there will be the effective formation of a stable metal alloy. This is due to the fact that: (a) even inside the parametric approach, there are another parameters to be considered and others yet to come; and (b) as there are another approaches not being dealed herein, there is a risk of not considering some aspects of evaluation.

Figure 1 shows the empty interface of the software "DIAMOY 1.0", i.e. before filling in the required fields. From the standpoint of its external architecture, the computer program presents a set of instruction lines, text-boxes, drop-down box, and buttons. In what concerns to its internal structure, an adequate sequence of programming sentences were written down in order to reflect all the criteria presented herein to form a solid solution. The interface consists of a unique screen through which the user interacts with the computer, thus simplifying the simulation of the alloy design. Some of the information are typed in, inserted by clicking on checkboxes, and selected from a dropdown list.

Figure 1. Empty interface of "DIAMOY 1.0"



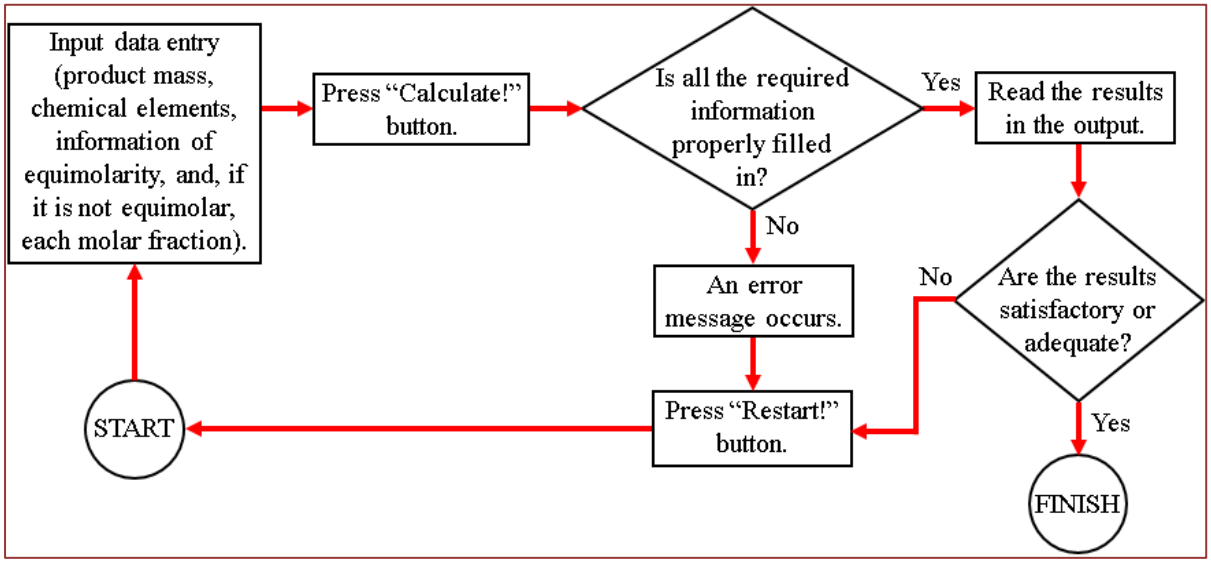
Source: own authorship (2021).

There are four regions to highlight as input data. The first input is the product mass or mass of the formed alloy in grams, represented by the "Product mass:" field. The second input is described by the selection of the required chemical elements to form the solid solution ("Alloy elements:" field), whereas the third is referred to answer whether the solution is equimolar or not, represented by the question field "Equimolar?". If the solution is selected as equimolar, the fourth region is not required to be filled in. However, if it is not equimolar, the fourth region has to be filled in with the molar fraction of each chemical element involved. To display the results, the blue button "Calculate!" must be pressed.

There are also two regions of output data. The first region is intended to present the mass in grams of each chemical element involved in the solid solution formation. The second one shows the values for all the ten parameters in their respective unities and the four criteria statuses. If different input data have to be entered into the computer program, the red button "Restart!" must be pressed. The software restarts with all the fields in the empty state.

In order to facilitate the understanding of how the software must be operated, a basic workflow is schematically shown by the flowchart in Fig. 2. The user types in the required texts and selects the desired options in the input data region. Then, the blue button "Calculate!" must be pressed. If one of the pertinent fields is not selected or is not filled in properly, an error message arise with some guidance to fix it. In this case the user must press the red button "Restart!" in order to fill in properly the input data this time. On the other hand, if the software is adequately fed, it will provide the previously described output data. If these results are satisfactory to build up the required metal alloy, then the process finishes. If the results are not adequate to the objectives, consequently another run can be made by pressing the "Restart!" button.

Figure 2. Software workflow.



Source: own authorship (2021).

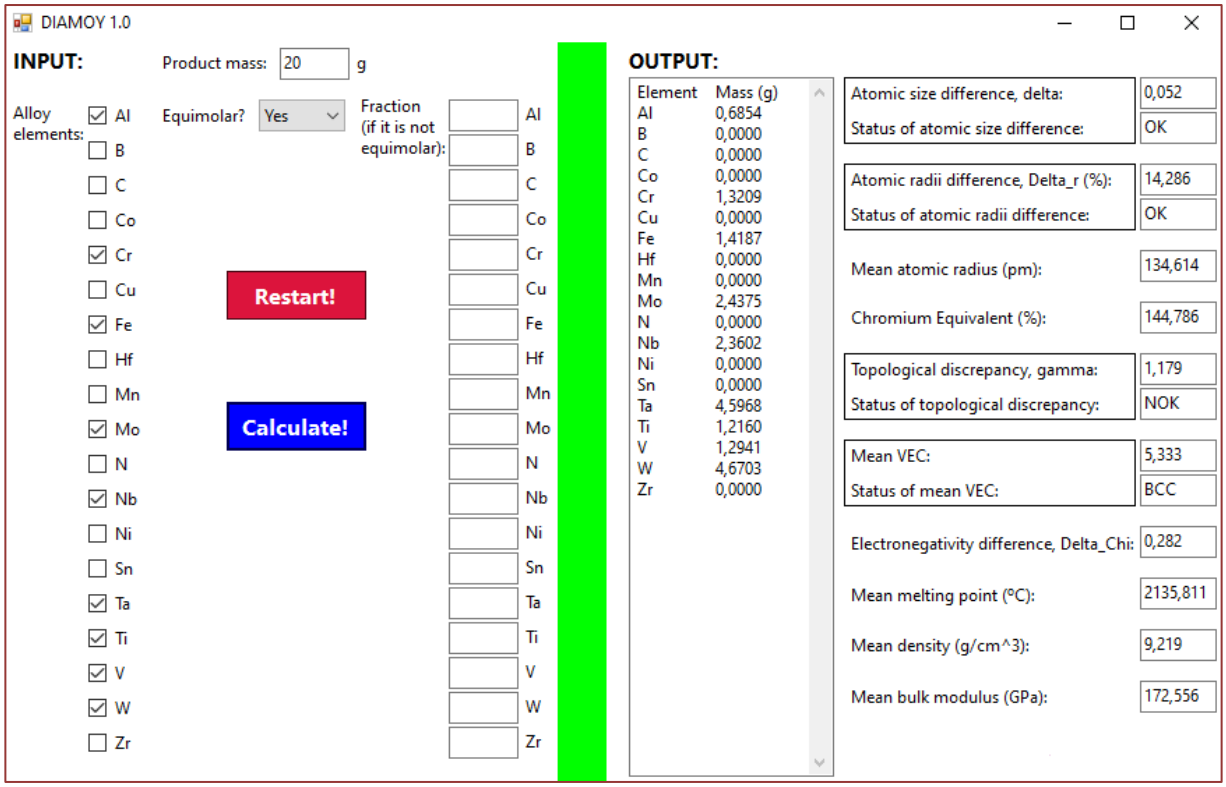
4. SOFTWARE OUTPUTS (RESULTS AND DISCUSSION)

This section addresses the comparison of the results from the developed software (embedded with the equations presented herein) with those extracted from Restivo and Restivo, 2021, more specifically the denominated metal alloy 6. Thus, the validation of the software is accomplished by comparing the referred results.

Figure 3 shows the results obtained from the software. As already mentioned, the input data were inserted in the left side, and the output is shown in the right one. Between parameter values and statuses, fourteen output data were presented. It is important to note that the value of the product mass (20 *g*) enterted does not have a direct relationship with the calculated parameters, but with the mass of each element of the solid solution. Table 1 compares these results with those from Restivo and Restivo, 2021 by the relative error statistical tool. The first column is the parameter nomenclature, the second and third

columns are, respectively, the values of Restivo and Restivo, 2021, and the calculated by the software. Finally, the last column corresponds to the relative error between the two sources.

Figure 3. Interface of "DIAMOY 1.0" showing the results related to the metallic alloy 6 (Restivo and Restivo, 2021)



Source: own authorship (2021).

Table 1. Comparison of parameter values between (Restivo and Restivo, 2021) and the software developed in this work (DIAMOY 1.0)

Parameter	Restivo and Restivo, 2021	Software "DIAMOY 1.0"	Relative error (%)
δ	0.053	0.052	1.923
$\Delta r(\%)$	14.500	14.286	1.498
Cr_{eq}	145.000	144.786	0.148
γ	1.179	1.179	0.000
$\tilde{V}$	5.330	5.333	0.056
$\Delta\chi$	0.282	0.282	0.000
$\tilde{T}$ (ºC)	2135.850	2135.811	0.002
$\tilde{\rho}$ (g/cm³)	9.390	9.219	1.855

Source: own authorship (2021).

There is a relatively good agreement between the results obtained by the two sources, which ranges from 0.000 (γ and $\Delta\chi$) to 1.923% (δ) for the alloy 6. It is important to highlight that the obtained null values of relative error probably justifies by not adopting a higher precision in the calculation related to both sources of comparison. In what refers to the status of each criteria, the only one not attended was the

corresponding to the topological discrepancy, γ, which status in Fig. 3 is "NOK" (not ok). This means that this parameter was not attended because γ should be less than 1.175, as described in section 2.

Therefore, for example, within a margin of error of approximately 2%, this set of results can be used to validate the software related to the precision mentioned for the application of alloy 6. Moreover, despite the relative error obtained, none of the statuses found via the computer program was different from the obtained in (Restivo and Restivo, 2021). Therefore, the computer program presented may be used as a helping tool to partially predict the behavior of the intended alloy and potentially be tested in the design of similar UHMAs.

5. CONCLUSIONS

This paper introduced a software programmed in Microsoft Visual Basic 6.0® that aims at being used in the design process of ultra-hard metal alloys (UHMAs) in what concerns the feasibility of forming a stable multi-component alloy. It was coded taking into account a set of ten parameters and four associated criteria of the parametric approach.

The software was subjected to a running test in order to validate the calculation process of alloy 6, denomination given in the work of (Restivo and Restivo, 2021). The parameters calculated by the software presented a relatively good agreement with the values provided in the cited reference (approximately 2% of relative error).

The major contributions of the designed software are the following: (a) the provision of a tool which contains a few of the most used parameters and some of their associated criteria to design a multi-component metal alloy, hence facilitating the alloy evaluation process; (b) the acceleration of a stage in the design process by just a few user-machine interactions; (c) the transformation of the evaluation process into a portable tool, which can be applied in any Windows®-based device.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge FAPESP council for funding the research through project 2020/09736-3.

REFERENCES

[1] Dennis, D. H. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys in ASM Handbook*, vol.1, ASM International, Ohio, USA, 1993.

[2] Fang, S.; Xiao, X.; Xia, L.; Li, W.; Dong, Y. Relationship between the widths of supercooled liquid regions and bond parameters of Mg-based bulk metallic glasses. Journal of Non-crystalline Solids, v.321, p.120-125, 2003.

[3] Gao, M.C.; Alman, D.E. Searching for next single-phase high-entropy alloy compositions. Entropy, v.15, p.4504-4519, 2013.

[4] Guo, S.; Ng, C.; Lu, J.; Liu, C.T. Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. J. Appl. Phys., v.109:103505, p.1-5, 2011.

[5] Hu, Q.; Guo, S.; Wang, J.M.; Yan, Y.H.; Chen, S.S.; Lu, D.P.; Liu, K.M.; Zou, J.Z.; Zeng, X.R. Parametric study of amorphous high-entropy alloys formation from two new perspectives: atomic radius modification and crystalline structure of alloying elements. Scientific Reports, v.7:39917, p.1-12, 2017.

[6] Huang, S.; Vitos, L. High Entropy Alloys: Elastic Parameters and Trends. In: Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2019.

[7] Klaus, M.Z. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In: ASM Handbook, vol.2, ASM International, Ohio, USA, 1993.

[8] Razuan, R.; Jani, N. A.; Harun, M. K.; Talari, M. K. Microstructure and hardness properties investigation of Ti and Nb added FeNiAlCuCrTixNby high entropy alloys. Transactions of the Indian Institute of Metals, v.66, n.4, p.309-312, 2013.

[9] Restivo, T.A.G.; Restivo, G.M.G. Development of Ultra-Hard Multicomponent Alloys. Journal of Materials Research, v.36, p.1316-1327, 2021.

[10] Ryu, S.H.; Yu, J. A new equation for the Cr equivalent in 9 to 12 pct Cr steels. Metallurgical and Materials Transactions A, v.29A, p.1573-1578, 1998.

[11] Singh, K.A.; Kumar, N.; Dwivedi, A.; Subramaniam, A. A geometrical parameter for the formation of disordered solid solutions in multi-component alloys. Intermetallics, v.53, p.112-119, 2014.

[12] Shun, T.-T.; Chang, L.-Y.; Shiu, M.-H. Microstructures and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiTix alloys. Materials Science & Engineering A, v.556, p.170-174, 2012.

[13] Tazuddin, A.; Biswas, K.; Gurao, N.P. Deciphering micro-mechanisms of plastic deformation in a novel single phase fcc-based MnFeCoNiCu high entropy alloy using crystallographic texture. Materials Science & Engineering A, v.657, p.224-233, 2016.

[14] Tazuddin, A.; Gurao, N.P.; Biswas, K. In the quest of single phase multi-component multiprincipal high entropy alloys. Journal of Alloys and Compounds, v.697, p.434-442, 2017.

[15] Wang, Z.; Huang, Y.; Liu, C.T.; Li, J.; Wang, J. Atomic packing and size effect on the Hume-Rothery rule. Intermetallics, v.109, p.139-144, 2019.

[16] Wu, Y.; Wang, H.; Cheng, Y.; Liu, X.; Hui, X.; Nieh, T.; Wang, Y.; Lu, Z. Inherent structure length in metallic glasses: simplicity behind complexity. Scientific Reports, v.5:12137, p.1-10, 2015.

[17] Xie, L.; Brault, P.; Thomann, A.-L.; Bauchire, J.-M. AlCoCrCuFeNi high entropy alloy cluster growth and annealing on silicon: A classical molecular dynamics simulation study. Applied Surface Science, v.285P, p.810-816, 2013.

[18] Yang X.; Zhang, Y. Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. Mater Chem. Phys., v.132, p.233–238, 2012.

[19] Zhang, C.; Zhang, F.; Chen, S.; Cao, W. Computational thermodynamics aided high-entropy alloy design. JOM, v.64, n.7, p.839-845, 2012.

[20] Zhang, F.; Zhang, C.; Chen, S.L.; Zhu, J.; Cao, W.S.; Kattner, U.R. An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, v.45, p.1-10, 2014.

Capítulo 18

Theoretical study of the influence of noise, sample rate and rotation in the identification of unbalance in the time domain

Fabio Dalmazzo Sanches
Robson Pederiva

Abstract. This paper describes a method to identify unbalance parameters (magnitude and phase) in a two-disk rotor. The unbalance is determined considering correlation analysis between rotor responses in time domain and least-squares fitting. The rotor outputs are determined in two situations: the nonfaulty (normal) condition, in which only a residual unbalance is present, and the damaged one, which is a sum of the unbalance response and the normal vibrations. Thus, the unbalance response, which is the difference between the total and normal responses, is called a residual, which is used in the identification process. Finite elements, the Guyan model reduction method, as well as correlation analysis, are employed to generate an identification equation that involves only the rotor responses acquired in the disk's position. The goal of this study is to simulate some situations that affect the identification process in time domain and can occur in an experimental procedure: sample rate, noise in the acquired signals and discrepancies in the rotor speed. Ten unbalance configurations, considering magnitudes and phases of the unbalances for each disk are taken into account. The results indicate that the identification procedure provides accurate results and the methodology can be used in experimental tests.

Keywords: Unbalance identification, Correlation Analysis, Rotordynamics

1. INTRODUCTION

Several types of rotating machines are used in manufacturing environments, e.g., pumps, compressors, fans, generators, etc. These machines play important roles in industrial production chains and any malfunction or unexpected stoppage may result in heavy financial losses. Therefore, accurate and reliable assessments of the dynamic characteristics of rotor-bearing-coupling systems are necessary in order to provide accurate information for the regular maintenance of these machines, thereby ensuring the prevention of serious damage.

One way to understand the dynamic behavior of a machine is by means of the mathematical model of the equipement. Model-based approaches are founded on reliable mathematical models of both the rotor system and possible faults. These models must be sufficiently simple to enable fast online calculations, but exact enough to reproduce the measured vibrations of the machine (Markert, Platz and Seidler, 2001).

The main causes of faults are: unbalance, misalignment, rotor bow/bent, rotor crack, rubbing, etc. Sudhakar and Sekhar (2011) point out that any defect in rotors will affect their vibration behavior and the nature of this effect differs in different faults.

Unbalance is a great source of malfunctions in rotating machines and efforts have been made to identify its characteristics: magnitude and phase.

The concept of residuals, defined as the differences between the vibrations of damaged systems and the normal vibrations of undamaged systems, are used to identify faults in rotating machines. Markert, Platz and Seidler (2001) used a time domain technique to identify unbalance and rubbing in a test rig. Unbalance and misalignment (Jalan and Mohanty, 2009) and tranverse cracks (Jain and Kundra, 2004) were some faults identified using the residuals. Frequency domain can be used to identify unbalance, bow and misalignment: Bachschmid, Pennacchi and Vania (2002) and Bachschmid *et al.* (2000); as well as unbalance and bow: Vania and Pennacchi (2004).

One technique that be employed to identify parameters in a dynamic system is the correlation analysis. This method, which was proposed by Pederiva (1992), involves the correlation matrices formed by the rotor outputs in the time domain to identify physical parameters of the rotor by means of random excitation. Eduardo and Pederiva (2002) adapted the method to detect faults under random and unbalance forces, using artificial neural networks.

This paper is a theoretical study that combines the technique described by Pederiva (1992) with the aforementioned concept of residuals to identify the unbalance parameters (magnitude and phase) based only on unbalance responses. The goal is simulate some pratical aspects that can occur in a future experimental identification: sample rate, noise in the acquired signals and discrepancies in the rotor speed. The rotor model is determined by finite elements (FE), and the fault parameters are identified considering ten unbalance configurations in a two-disk rotor. Guyan model reduction was employed to enable an estimator that uses only the vibrations acquired at the disk's positions. The simulations proved to be feasible in determining the unbalance parameters of a complex dynamic system.

2. MATHEMATICAL MODELING

The equation of motion of the rotating machine can be expressed in the following general form:

$$[M]\{\ddot{\xi}(t)\}+[P]\{\dot{\xi}(t)\}+[K]\{\xi(t)\}=[H]\{n(t)\} \quad (1)$$

where [*M*] is the mass matrix, [*P*] is the force proportional to velocity matrix, which contains the damping and gyroscopic matrices, and [*K*] is the force proportional to displacement matrix; all previously mentioned matrices have order (*n*,*n*). $\{\ddot{\xi}(t)\}$, $\{\dot{\xi}(t)\}$ and $\{\xi(t)\}$ are the vectors of acceleration, velocity and displacement, respectively whose orders are equal to *g* and contain the translational and rotational degrees of freedom. [*H*] is the unbalance matrix with order (*n*,*p*). $\{n(t)\}$ is the input vector of unbalance and and have order *p*.

The differences between the vibrations of the damaged system and the normal vibrations of the undamaged one, which are known as residuals, are given by:

$$\{\xi(t)\} = \{\xi_T(t)\} - \{\xi_o(t)\} \quad (2)$$

$$\{\dot{\xi}(t)\} = \{\dot{\xi}_T(t)\} - \{\dot{\xi}_o(t)\} \quad (3)$$

$$\{\ddot{\xi}(t)\} = \{\ddot{\xi}_T(t)\} - \{\ddot{\xi}_o(t)\} \quad (4)$$

(2), (3) and (4) are residual displacements, velocities and accelerations, respectively. The indexes *T* and *o* are referent to the total and normal (no-faulty) vibrations respectively.

One can assume that the residual vibrations $\{\xi(t)\}$ are caused by additional time-varying forces acting on the undamaged system and generated by the fault (Markert, Platz and Seidler, 2001):

$$[M]\{\ddot{\xi}_T(t)\} + [P]\{\dot{\xi}_T(t)\} + [K]\{\xi_T(t)\} = \{F_o(t)\} + \Delta F(\rho, t) \quad (5)$$

with ρ being the fault parameter vector. These additional forces change the dynamic behavior of the system and the extent of the changes depends on the type, location and magnitude of the fault.

It is possible to have an equation that contains the measured residual vibrations and the forces that causes the malfunction:

$$[M]\{\ddot{\xi}(t)\} + [P]\{\dot{\xi}(t)\} + [K]\{\xi(t)\} = \Delta F(\rho, t) \quad (6)$$

Unbalance is modeled as a synchronous force with the rotor rotation that is present in a given location in the rotor:

$$\rho = \{r_p \quad u_b \quad \beta\}^T \quad (7)$$

r_p, u_b and β are the position, magnitude and phase of the unbalance.

The unbalance forces are given by:

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ F_u \\ F_w \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ m_u d\Omega^2 & 0 \\ 0 & m_u d\Omega^2 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sin(\Omega t + \beta) \\ \cos(\Omega t + \beta) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

where is m_u the unbalanced mass, d is the eccentricity, Ω is the rotor running speed and β is the unbalance phase angle. F_u and F_w are the forces expressed in horizontal and vertical directions, respectively.

Equation (1) can be expressed in the well known state space representation:

$$\{\dot{x}(t)\}_{(2n,1)} = [A]_{(2n,2n)}\{x(t)\}_{(2n,1)} + [E_u]_{(2m,2)} \begin{Bmatrix} \sin(\Omega t) \\ \cos(\Omega t) \end{Bmatrix} = [A]\{x(t)\} + [E]\{n(t)\} \quad (9)$$

Details about the matrices [*A*], [E_u] can be seen in details in Sanches (2015). The subscripts *u* an *b* mean the unbalance and bow, respectively.

The correlation matrix is defined by:

$$[R_{xx}(t,t+\tau)]=[R_{xx}(\tau)]=\varepsilon\{\{x(t)\}\{x^T(t+\tau)\}\} \quad (10)$$

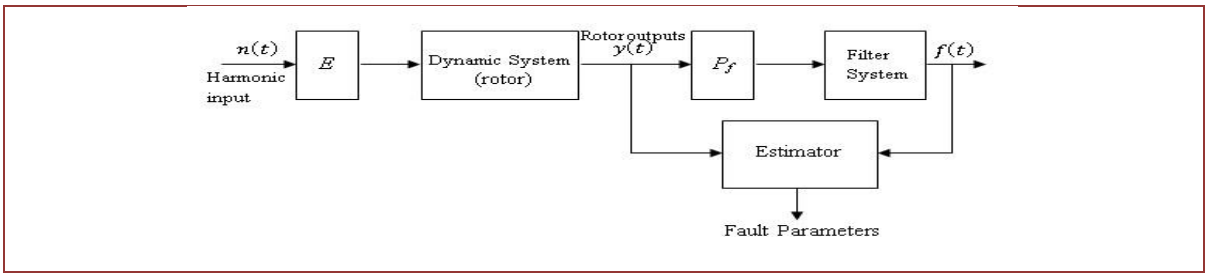
where ε represents the expected value between two parameters, and τ is a time shift that causes a delay in the state vector.

The estimation equation in time domain is given by (Pederiva, 1992 e Eduardo, 2003):

$$[A][R_{xx}(\tau_i)]+[R_{xx}(\tau_i)][A]^T+[E][R_{nx}(\tau_i)]+[R_{xn}(\tau_i)][E]^T=0 \quad (11)$$

Equation (11) is valid only when the entire state vector is known, which is not possible in practice. In order to overcome this difficulty, the rotor model is reduced by the well-known Guyan model reduction technique so only the measured degrees of freedom *df* of the rotor are taken into account. In addition, an auxiliary (filter) system is used associated with the measured outputs rotor, whose function is to correlate different time instants, thereby enabling the parameters to be estimated with only a few system outputs. The filter works as illustrated in Fig. 1:

Figure 1 - Diagram of the filter actuation



P_f is the input filter matrix (Pederiva, 1992). Details about the filter actuation and its mathematical modeling can be found in Sanches (2015).

The identification equation in time domain considering only the disk translational *df* is given by (Sanches, 2015):

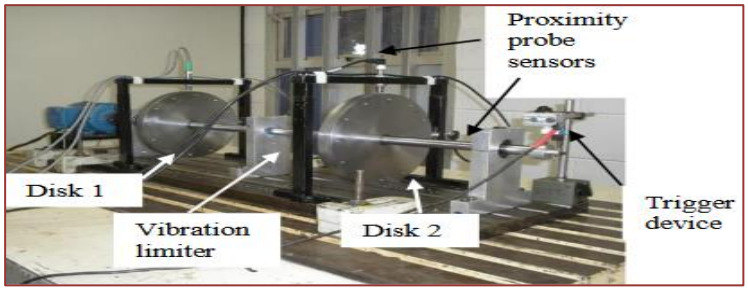
$$-r_{\eta_3\xi_m}+\left\{r_{\eta_1\xi_m}\ \vdots\ r_{\eta_2\xi_m}\right\}\begin{bmatrix}A_1^{*T}\\A_2^{*T}\end{bmatrix}=Q_{3_{(1,1:2)}} \quad (12)$$

where Q_3 is a sub matrix of $[Q]$ (Sanches, 2015). η_1, η_2 and η_3 are the filter outputs and ξ_m is the vector of the measured *df.*

3. ROTOR DESCRIPTION

The simulations described further are made considering a real test rig, which is shown in Fig.2:

Figure 2 – Test rig



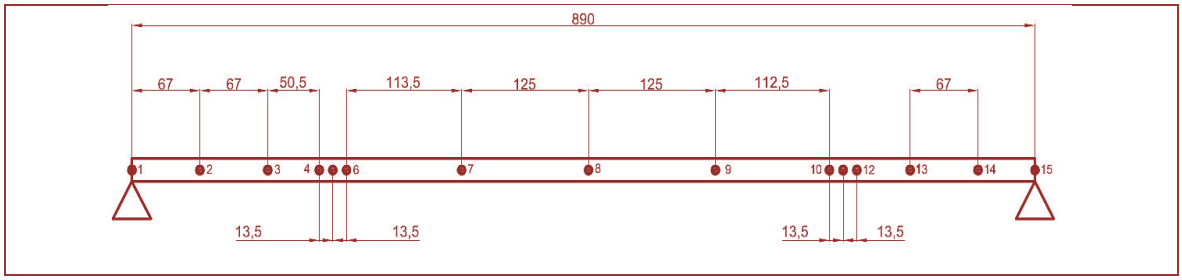
The rotor characteristics are showed by table 1:

Table 1 – Test rig characteristics

Properties	Material	Inner diameter	Outer diameter	Mass	Thickness
Shaft	Steel 1045	-	20 mm	2.46 kg	-
Disk	Steel 1020	20 mm	220 mm	7.90 kg	27 mm

The test rig was modeled using finite elements and the shaft was discretized in 15 nodes with a total of 60 degrees of freedom distributed as shown in Fig. 3.

Figure 3 - FEM nodes in the test rig – Dimensions in mm



Disks 1 and 2 are placed at nodes #5 and #11, respectively.

Some rotor parameters are unknown and have strong influence on the rotor dynamic behavior: bearing parameters – stiffness (K) and damping (C); proportional damping coefficients α and γ; and coupling angular stiffness (K_r). These parameters were obtained by the differential evolution optimization technique (Sanches, 2015) comparing the experimental Frequency Response Functions and the numerical ones in each iteration step that updates the rotor model. The results after the optimization procedure is showed in Table 2:

Table 2 – Optimized rotor features

Characteristics	Variables	Results
Bearing	K_{xx}	3.66e6 N/m
	K_{zz}	3.26e6 N/m
	C_{xx}	458.19 Ns/m
	C_{zz}	115.20 Ns/m
Proportional damping: $\alpha[M] + \gamma[K]$	α	3.74
	γ	1.30e-6
Coupling angular stiffness	K_r	312.22 Nm/rad

4 NUMERICAL IDENTIFICATION

Since the rotor presents two unbalance planes, the simulations take into account unbalances at both disks. Ten simulated cases will be performed considering the following aspects: magnitude, phase and residual unbalance for each disk. The simulated cases are showed by Table 3:

Table 3 – Unbalance configurations

Configurations	*Magnitude* (m_1d_1)	*Phase* (β_1)	*Magnitude* (m_2d_2)	*Phase* (β_2)
C.1	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+0^0$
C.2	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+30^0$
C.3	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+90^0$
C.4	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+150^0$
C.5	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+180^0$
C.6	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+240^0$
C.7	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+270^0$
C.8	2.33e-4 kg.m	$+90^0$	2.27e-4 kg.m	$+300^0$
C.9	2.33e-4 kg.m	$+0^0$	2.27e-4 kg.m	$+0^0$
C.10	1.16e-4 kg.m	$+180^0$	1.16e-4 kg.m	$+180^0$
Residual unbalance	0.25e-4kg.m	$+350^0$	0.22e-4 kg.m	$+120^0$

The subscripts 1 and 2 are referent to the disks 1 and 2, respectively.

Eleven rotating speeds are used in the identification process. Four of them are lower than the first two critical speeds (backward and forward), i.e., 840, 900, 960 and 1020 rpm. The other seven rotations are between the first two critical speeds and the second ones: 1500, 1680, 1800, 2100, 2580, 2760 and 3000 rpm. The total simulated response time is 10s and the sampling time is equal to 0.1 ms; also, there are three delay instants (τ): 0.1 ms, 1 ms and 2 ms. Equation (12) is applied considering the rotor responses at only the disks positions in the horizontal and vertical directions.

Table 4 shows the results considering the absence of noise in the rotor responses:

Table 4 – Identification of unbalance without noise

Case	Disc.1 (kg.m)	Error	Phase disk 1	Error	Disc.2 (kg.m)	Error	Phase disk 2	Error
C.1	2.33e-4	0.00%	+90.29º	+0.32%	2.26e-4	0.00%	+359.65º	-0,10%
C.2	2.32e-4	-0.43%	+90.22º	+0.24%	2.26e-4	0.00%	+29.75º	-0,83%
C.3	2.32e-4	-0.43%	+90.07º	+0.08%	2.26e-4	+0.44%	+90.07º	+0,08%
C.4	2.32e-4	-0.43%	+89.89º	-0.12%	2.27e-4	+0.44%	+150.29º	+0,19%
C.5	2.32e-4	-0.43%	+89.75º	-0.14%	2.27e-4	+0.44%	+180.28º	+0,16%
C.6	2.33e-4	0.00%	+89.77º	-0.28%	2.28e-4	+0.44%	+240.03º	+0,01%
C.7	2.34e-4	+0.43%	+89.79º	-0.23%	2.29e-4	+0.44%	+269.74º	-0,10%
C.8	2.34e-4	+0.43%	+90.00º	0.00%	2.28e-4	+0.44%	+299.71º	-0,10%
C.9	2.32e-4	-0.43%	+0.07º	+0.02%	2.26e-4	+0.44%	+0.07º	+0,02%
C.10	1.15e-4	-0.86%	+180.08º	+0.04%	1.15e-4	-0.86%	+180.07º	+0,04%

As can be seen in Table 4, the unbalances were identified accurately without noise in the rotor responses. The signal subtraction between the faulty condition and the normal one did not represent a problem in the identification process.

Since there is always some amount of noise in experimental measurements, both the faulty and normal signals were simulated by adding white Gaussian noise, in which the signal-to-noise ratio is equal to 22 dB. This enabled the method to be tested in a situation closer to experimental measurements. Table 5 lists the results of the identification:

Table 5 – Identification of unbalance with 22 dB of random noise

Case	Disc.1 (kg.m)	Error	Phase disk 1	Error	Disc.2 (kg.m)	Error	Phase disk 2	Error
C. 1	2.34e-4	+0.43%	+90.29º	+0.32%	2.28e-4	+0.44%	+0.30º	+0.08%
C. 2	2.32e-4	-0.43%	+90.24º	+0.27%	2.26e-4	-0.44%	+29.68º	-1.07%
C. 3	2.32e-4	-0.43%	+90.11º	+0.12%	2.25e-4	-0.88%	+89.95º	-0.06%
C. 4	2.32e-4	-0.43%	+90.17º	+0.19%	2.28e-4	+0.44%	+150.62º	+0.41%
C. 5	2.32e-4	-0.43%	+90.16º	+0.18%	2.30e-4	+1.32%	+180.79º	+0.44%
C. 6	2.40e-4	+3.00%	+89.57º	-0.48%	2.30e-4	+1.32%	+238.24º	-0.73%
C. 7	2.52e-4	+8.15%	+87.42º	-2.87%	2.52e-4	+11.51%	+271.09º	+0.40%
C. 8	2.24e-4	-3.86%	+91.10º	+1.22%	2.28e-4	+0.44%	+302.26º	+0.75%
C. 9	2.32e-4	-0.43%	+0.23º	+0.06%	2.26e-4	-0.44%	+0.02º	+0.01%
C. 10	1.15e-4	-0.86%	+180.04º	+0.02%	1.15e-4	-0.86%	+180.08º	+0.04%

As expected, the identification results were worse than the those listed in Table 4, where no noise was taken into account. The largest discrepancy was in the identification of case 7 (C. 7), which contains the unbalances at each disk exactly out of phase. Using the least squares method, it is a challenging task to distinguish each effect, even though case 3, in which the unbalances are simulated exactly in phase, was determined with minor deviations.

Since the test rig will be controlled by a frequency inverter, there may be discrepancies between the value shown by the frequency inverter display and the real one that drives the machine. To take these differences into account, Table 6 lists simulation results considering actual rotating speeds 3% lower than the nominal speeds for both residual and total signals.

Table 6 – Identification of unbalance with discrepancies between the actual and nominal rotating speeds

Case	Disc.1 (kg.m)	Error	Phase disk 1	Error	Disc.2 (kg.m)	Error	Phase disk 2	Error
C. 1	2.19e-4	-6.01%	+90.34º	+0.38%	2.13e-4	-6.17%	+359.52º	-0.13%
C. 2	2.18e-4	-6.44%	+90.34º	+0.38%	2.12e-4	-6.61%	+29.63º	-1.23%
C. 3	2.17e-4	-6.87%	+90.08º	+0.09%	2.11e-4	-7.05%	+90.07º	+0.08%
C. 4	2.17e-4	-6.87%	+89.73º	-0.30%	2.12e-4	-6.61%	+150.42º	+0.28%
C. 5	2.18e-4	-6.44%	+89.64º	-0.40%	2.13e-4	-6.17%	+180.44º	+0.24%
C. 6	2.19e-4	-6.01%	+89.74º	-0.29%	2.14e-4	-5.73%	+240.13º	+0.05%
C. 7	2.20e-4	-5.58%	+89.86º	-0.16%	2.15e-4	-5.29%	+269.83º	-0.06%
C. 8	2.20e-4	-5.58%	+90.09º	+0.10%	2.14e-4	-5.73%	+299.68º	-0.11%
C. 9	2.17e-4	-6.87%	+0.07º	+0.02%	2.11e-4	-7.05%	+0.07º	+0.02%
C. 10	1.08e-4	-6.90%	+180.08º	+0.04%	1.08e-4	-6.90%	+180.07º	+0.04%

Table 6 shows the importance of knowing the rotor speeds. The discrepancies caused major deviations in the magnitudes identification, which is dependent of the rotating speed. The locations (phases) are determined more accurately than the magnitudes.

The trigger device is a small plate which generates a rotating surface that passes through a sensor. The trigger signal starts when the rotating plate is detected by the sensor and this instant is essential to the phase identification. The purpose of the following simulations is to study the effect of the sample rate on the identification results, and to ascertain what happens if the trigger signal does not start at the same point as the trigger plate. To perform these simulations the faulty signals are delayed one sampling time (τ) in relation to the undamaged ones. The studies were carried out for five configurations from the total of ten listed in Table 3: C.1, C.3, C.5, C.7 and C.10. Two sampling times were tested: 10^{-3} s and 10^{-4} s, the latter being the sampling time used in all the simulations so far. No noise was considered in these simulations.

Table 7 – Identification of unbalance with sampling time equal to 0,1ms

Case	Disc.1 (kg.m)	Error	Phase disk 1	Error	Disc.2 (kg.m)	Error	Phase disk 2	Error
C. 1	2.34e-4	+0.43%	+90.17º	+0.19%	2.26e-4	-0.44%	+359.59º	-0.11%
C. 3	2.32e-4	-0.43%	+91.52º	+1.69%	2.25e-4	-0.88%	+91.67º	+1.86%
C. 5	2.33e-4	-0.00%	+91.19º	+1.32%	2.28e-4	+0.44%	+181.82º	+0.84%
C. 7	2.34e-4	+0.43%	+91.46º	+1.62%	2.29e-4	+0.88%	+271.30º	+0.48%
C. 10	1.15e-4	-0.86%	+181.24º	+0.69%	1.16e-4	-0.00%	+181.68º	+0.93%

Table 8 – Identification of unbalance with sampling time equal to 1 ms

Case	Disc.1 (kg.m)	Error	Phase disk 1	Error	Disc.2 (kg.m)	Error	Phase disk 2	Error
C. 1	2.47e-4	+6.01%	+110.00º	+22.22%	2.31e-4	+1.76%	+7.21º	+2.00%
C. 3	2.19e-4	-6.01%	+104.02º	+15.58%	2.05e-4	-9.69%	+106.27º	+18.08%
C. 5	2.47e-4	-6.01%	+98.01º	+8.90%	2.42e-4	+6.61%	+201.67º	+12.04%
C. 7	2.99e-4	+28.33%	+104.81º	+18.46%	2.93e-4	+29.07%	+284.01º	+5.19%
C. 10	1.03e-4	-11.21%	+191.13º	+6.18%	1.12e-4	-3.45%	+196.17º	+8.98%

In Tables 8 and 9, note that the sampling rate is an important parameter that strongly influences the identification results when the time domain is employed to generate the estimation equation.

5. CONCLUSIONS

This paper has shown the results of simulated identification of the unbalances present at two different planes in the rotor. In order to perform this identification, the rotor vibrations at the disks position together with the outputs of the auxiliary (filter) system were employed to generate the correlation matrices.

The purpose of this research is to simulated some aspects that can influence the identifications results in a future experimental procedure: noise in the vibration signals, the effects of sample rate when some delay occurs in the trigger signal and discrepancies between the value of the rotating speed showed by the display of the frequency inverter and the real one.

The validity of the method was demonstrated through simulations, which showed some precautions that should be taken when performing experimental tests.

REFERENCES

[1] Bachschmid, N., Pennacchi, P., Tanzi, E. and Vania, A. (2000) Accuracy of modeling and identification of malfunctions in rotor systems: experimental results. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 22 (3), 423-442.

[2] Bachschmid, N., Pennacchi, P., Vania, A. (2002) Identification of multiple faults in rotor systems. Journal of Sound and Vibration, 254 (2), 327-366.

[3] Eduardo, A.C., (2003) "Fault Diagnosis in Rotor Systems through Correlation Analysis and Artificial Neural Networks". Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineer, University of Campinas, Campinas (in Portuguese).

[4] Jain, J.R., Kundra, T.K. (2004), Model based online diagnosis of unbalance and transverse fatigue crack in rotor systems. Mechanics Research Communications, 31, 557-568.

[5] Jalan, A.K. and Mohanty, A.R. (2009), Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. Journal of Sound and Vibration, 327, 604-622.

[6] Markert, R., Platz, R. and Seidler, M. (2001), Model based fault identification in rotor systems by least squares fitting. International Journal of Rotating Machinery, 7 (5), 311-321.

[7] Pederiva, R., (1992), Parametric identification of stochastically excited mechanical systems. PhD thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Campinas – UNICAMP (in Portuguese).

[8] Pederiva, R., Eduardo, A.C., (2002) Parameter monitoring of a rotor system excited by stochastic forces. In: IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, Sydney, Austrália. Proceedings of the Sixth International Conference on Rotor Dynamics. Sydney, Australia : UNSW Printing Services, UNSW Sydney, 2052, Australia, E.J. Hahn and R.B. Randall (Editors), v. I, 310-317.

[9] Sanches, F.D., (2015), "Identificação Simultânea de Desbalanceamento e Empeno de Eixo em Rotores através de Análise de Correlações", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

[10] Sudhakar, G.N.D.S., Sekhar, A.S. (2011), Identification of unbalance in a rotor bearing system. Journal of Sound and Vibration, 330, 2299-2313.

[11] Vania, A. and Pennacchi, P. (2004), Experimental and theoretical application of fault identification measures of accuracy in rotating machine diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 18, 329–352.

Capítulo 19

Impactos da idade na atenção e percepção de condutores

José Ricardo Gabriel Kuniyoshi
Aurenice Cruz Figueira
Ana Paula Camargo Larocca

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o impacto da idade na atenção e percepção dos condutores nas placas de sinalização das rodovias, com o uso de simulador de direção. A amostra focou em condutores na faixa etária de 20 até 60 anos, que responde pelo maior número de condutores habilitados - quase 75 % do total. À medida que os motoristas ganham experiência na estrada, eles se tornam menos propensos a colidir e mais propensos a dirigir de maneira segura. No entanto, muitos condutores jovens e adultos passam a confiar demasiadamente, na sua habilidade de dirigir e acreditam, equivocadamente, dirigirem com segurança. A amostra estuda foi analisada de acordo com as seguintes faixas etárias: Grupo I, motoristas denominados "jovens" e Grupo II, motoristas denominados "adultos". Os dados coletados incluíram os do sistema de rastreamento do olhar (Smarteye) e de questionários aplicados após o teste. O cenário replicou um trecho de 10 km de uma rodovia brasileira. Os dados de rastreio do olhar permitiram a mensuração das seguintes variáveis: tempo de observação, tempo de fixação máximo na sinalização e o número de placas observadas. Ambos os grupos tiveram excelentes desempenhos, também, no Questionário Pós-condução no Simulador, com taxa média de acertos de 94% pelo Grupo I e 89% pelo Grupo de II. Quanto aos dados fornecidos pelo Smarteye, o Grupo II demonstrou ser mais atento em visualizar as sinalizações de velocidade. Por outro lado, esses voluntários precisaram, no geral, observar a placa de velocidade por mais tempo para poder percebê-la.

Palavras-Chave: Idade do condutor, excesso de confiança; sinalização vertical, simulador de direção, rastreamento de olhar.

1. INTRODUÇÃO

Os fatores humanos desempenham um papel importante em quase todos os acidentes de trânsito com ferimentos graves e fatalidades e pesquisar sobre como melhorar o comportamento do motorista parece ser um meio óbvio de abordar esse grave problema de saúde e colaborar com a sua mitigação.

Segundo a WHO (2018), os acidentes de trânsito provocam mais de 1,35 milhão de vítimas por ano, sendo essa uma das maiores causas de morte de jovens até 30 anos. No Brasil, somente para o ano de 2019, 19% dos envolvidos em acidentes com fatalidades foram os motoristas na faixa etária de 18 a 30 anos, e respondendo por 42 %, os motoristas na faixa etária de 31 a 60 anos (DATATRAN, 2019).

Muito embora as habilidades práticas de dirigir possam ser dominadas rapidamente, algumas habilidades (menos óbvias), como a percepção de riscos, exigem mais experiência (ISLER, et al., 2011; WONG et al., 2018; CHEN et al., 2019; OVIEDO-TRESPALACIOS et al., 2020). Isso significa que o excesso de confiança de condutores jovens e adultos os fazem pensar que estão no controle quando estão dirigindo de maneira insegura e se tornam mais propensos a correr riscos, pois acreditam que suas habilidades estão melhorando (CLARKE et al., 2006; ROSS, et al., 2016; OVIEDO-TRESPALACIOS et al., 2018; NGUYEN-PHUOC et al., 2020).

Motoristas jovens, por sua vez, também estão super-representados nas estatísticas de acidentes, em comparação com os motoristas adultos e idosos. Por exemplo, jovens motoristas com menos de 30 anos representam cerca de um décimo da população nos países da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), mas representam mais de um quarto dos motoristas mortos nas rodovias (WHO, 2018).

Desta forma, permanece evidente a necessidade de mais pesquisas sobre o comportamento dos condutores jovens e adultos. O objetivo da presente pesquisa é avaliar como a idade afeta o comportamento do motorista ao conduzir um veículo em um percurso de simulador de direção.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Muitas pesquisas estudam a alteração das capacidades cognitivas conforme o avanço da idade. EREL e LEVY (2016) revisaram artigos a respeito do impacto do envelhecimento nas funções cognitivas, de modo que verificaram que algumas melhoram com a idade, enquanto outras pioram ou, até mesmo, se mantêm. Um exemplo de um impacto negativo conforme o envelhecimento é a redução da atenção visual (EREL; LEVY, 2016).

DRAG e BIELIAUSKAS (2010) fizeram uma síntese das pesquisas realizadas no âmbito das mudanças fisiológicas que ocorrem à medida que o ser humano envelhece e, a partir disto, constataram que os níveis de atenção, como memória de curto prazo e memória associativa, são afetados negativamente com a idade.

LEDGER et al. (2019) compararam motoristas jovens e idosos, onde a maioria das relações entre as funções cognitivas e o desempenho de direção não apresentaram disparidades entre os dois grupos etários. Dessa forma, o estudo sustenta a ideia que há uma relação semelhante entre o funcionamento cognitivo e o desempenho de direção nos dois grupos etários.

Na pesquisa de PRADHAN et al. (2005), 72 participantes, divididos igualmente em três faixas etárias (16 e 17 anos, 19-29 anos e 60-75 anos), dirigiram em 16 cenários distintos em um simulador de direção, enquanto um sistema de rastreio do olhar, captava os movimentos dos olhos. A partir da posição dos olhos e do comportamento durante a condução, foi possível determinar se o condutor era capaz de perceber situações de risco e averiguar se a direção foi imprudente (não parar em uma sinalização de parada obrigatória, por exemplo). Esse estudo constatou que os condutores adultos têm maior facilidade para encontrar visualmente elementos do cenário, que são necessários para adquirir informação relevante à avaliação de potenciais riscos.

Diferente da pesquisa de PRADHAN et al. (2005), os estudos de HO et al. (2001) constataram que os efeitos do envelhecimento podem ser prejudiciais em algumas situações no trânsito. Neste estudo, participaram do experimento 14 condutores jovens (18 a 30 anos) e 14 condutores idosos (54 a 79 anos). Inicialmente, era apresentada uma tela com uma placa de sinalização de trânsito específica. Nas imagens seguintes, os voluntários deveriam procurar tal placa e escolher entre as teclas de “presente” ou “ausente”. Metade das cenas apresentava a sinalização; outra metade não. Os resultados indicaram que os condutores idosos tiveram menor precisão (maior quantidade de erros) e tempo de reação maior. Isso

mostrou que a dificuldade de encontrar as sinalizações nas cenas aumentou com a idade.

Delucia et al. (2003) constataram que os motoristas adultos possuem maior dificuldade em fazer julgamentos sobre a ocorrência de possíveis colisões em comparação com motoristas mais jovens. A partir de dados de acidentes de trânsito, Ayuso et al. (2020) fizeram um estudo sobre o impacto que o aumento da longevidade pode trazer para a gravidade dos acidentes na Espanha. Os resultados indicaram uma relação entre a gravidade dos acidentes de trânsito e a idade do motorista.

Um dos experimentos realizados por COSTA et al. (2018) possui uma essência semelhante ao de HO et al. (2001). Os voluntários observavam uma imagem de uma sinalização durante um intervalo de tempo. Se escolhessem a placa corretamente em um teclado modificado contendo 57 figuras, o intervalo de tempo que a próxima imagem ficaria na tela seria menor. Caso errassem, o tempo seria maior. A precisão de 100% foi alcançada quando a duração da imagem era de 130 ms.

Nas pesquisas em simulador de direção, é fundamental ter o conhecimento dos possíveis efeitos colaterais que o ambiente virtual pode causar, a fim de evitar que os condutores sintam quaisquer incômodos durante o experimento. Em um estudo sobre o desconforto causado pela realidade virtual (BECKER; NGO, 2016), os voluntários assistiram a vídeos de imagens estereoscópicas da parte interna de um veículo em movimento. O enfoque da pesquisa era estudar o desconforto do usuário devido à "doença do movimento", também chamada de Cinetose. Essa doença é a sensação de enjoo e náusea causada pelo movimento, real ou aparente (HOSSEINI et al., 2015), sendo o último o caso do simulador de direção. A doença do movimento em simulações também foi abordado em outros estudos, como o de VENKATAKRISHNAN et al. (2019).

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. PARTICIPANTES

O critério de seleção de voluntários foi feito de forma aleatória, por meio de divulgações em redes sociais e em órgãos da própria universidade. A única exigência era a de que o indivíduo deveria possuir a Carteira Nacional de Habilitação (CNH). Os voluntários foram divididos em dois grupos. Os voluntários entre 20 a 27 anos (M = 21,59; SD = 1,87) fizeram parte do Grupo I, enquanto os voluntários entre 41 e 61 anos (M = 53,00; SD = 6,16) fizeram parte do Grupo II. Mais detalhes da amostra se encontram na Tabela 1. Constatou-se, durante a fase de coleta de dados, que a faixa etária mais velha teve uma maior tendência a ter os sintomas de motion sickness. Dois voluntários do grupo dos condutores adultos solicitaram interromper a simulação. Assim, os dados referentes a esses voluntários foram descartados.

Tabela 17: Dados gerais sobre a amostra de voluntários que participaram e concluíram o experimento

	Total	Grupo I	Grupo II
Número de voluntários	23	15	8
Proporção masculino/feminino	2,71	3,25	1,67

3.2. O SIMULADOR DE DIREÇÃO

O simulador de direção de alto de base fixa utilizado nesta pesquisa pertence ao Departamento de Engenharia de Transportes (STT/EESC) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). É um equipamento do tipo *human-in-the-loop* utilizado para a análise e observação do comportamento do condutor no ambiente simulado da via e tenta retratar uma experiência de direção semelhante ao mundo real (LAROCCA et al., 2018). Os três principais componentes deste simulador de direção são: o hardware, os softwares e o sistema de rastreio do olhar. Na Figura 1, encontra-se uma foto do simulador usado para a realização dos experimentos.

Figura 30: simulador direção utilizado na pesquisa

3.2.1. HARDWARE

O simulador de direção consiste em um *cockpit* com banco de carro equipado de um volante de direção Logitech G27 que proporciona torque no volante durante a condução, alavanca de câmbio com seis marchas, pedais de acelerador, freio e embreagem interligados. O sistema de projeção é composto por um projetor *DepthQ HDs3D2* (com resolução de 1080*p* e taxa de atualização de 60 Hz) e uma tela de projeção, com formato de 1425 mm na horizontal por 800 mm na vertical, posicionadas à frente do condutor, e fornece um campo de visão bastante amplo, com liberdade de 120 graus na horizontal e de 50 graus na vertical. A tela central posicionada à frente do condutor possui resolução de 1,70 arc min/pixel (LAROCCA et al., 2018).

O sistema de processamento é integrado por três computadores de alto desempenho. Simultaneamente, cada computador executa exclusivamente um dos seguintes processos: modelagem e geração visual do ambiente virtual, modelagem da dinâmica veicular e controle do sistema de rastreio do olhar.

3.2.2. *SOFTWARES*

O simulador de direção usado na presente pesquisa utiliza dois softwares: o *software Vi-CarRealTime* – desenvolvido pela Vi-Grade® e comercializado no Brasil pela empresa Multicorpos® e o pacote *Virtual Test Drive* desenvolvido e comercializado pela Vires®. O software *Vi-CarRealTime* é responsável tanto pela simulação em tempo real do veículo no ambiente como pela dinâmica veicular. O intuito do pacote *Virtual Test Drive* é a realização da modelagem e a simulação do ambiente virtual do simulador de direção.

Os softwares e as partes físicas do simulador de direção permitem a interação do ambiente virtual com o condutor, uma vez que possibilitam a geração e a atualização da cena exibida nas telas do simulador à frente do condutor, além da execução das situações desejadas, controle de tráfego, alteração de parâmetros do veículo, entre outros fatores. Na Figura 2, encontra-se uma imagem de um trecho do cenário gerado pelos softwares.

Figura 31: Exemplo de simulação da rodovia

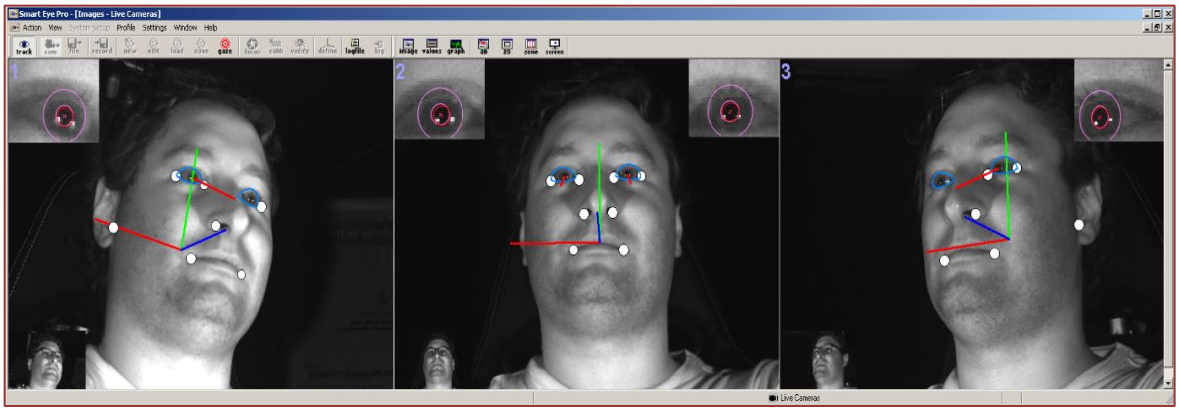
3.3. O SISTEMA DE RASTREIO DO OLHAR

O Sistema de Rastreio do Olhar, desenvolvido pela empresa *SmartEye*, é constituído por quatro câmeras e uma tela que exibe o cenário da rodovia a uma frequência de 60 Hz. Dessa forma, o sistema processa as imagens recebidas em tempo real e indica o ponto da tela em que corresponde ao foco da atenção do condutor, por meio da detecção da posição da pupila.

Das quatro câmeras, três são monocromáticas e estão posicionadas à frente do condutor, 15º abaixo dos olhos, a 1 m de distância do rosto e a 40 cm de distância uma da outra. Além disso, todas as três possuem lentes de 8 mm. Dessa forma, é possível captar a posição da pupila com exatidão de 2º dentro de um campo de visão de 50º na horizontal e 30º na vertical, com no mínimo duas câmeras, ao longo do tempo de condução. A quarta câmera, posicionada atrás do condutor, é colorida e possui uma resolução de 480p. Essa câmera grava o cenário simulado sob a perspectiva do campo de visão do motorista, a uma frequência de 25 Hz.

O software do sistema define um sistema de coordenadas e localiza as quatro câmeras, os olhos do condutor e as telas de projeção. Assim, são calculados os pontos de intersecção do plano que contém a tela e o vetor definido pelo olhar, obtido através da orientação da pupila detectada pelas três câmeras. A quarta câmera é responsável pela transformação dos pontos de intersecção em pixels da imagem coletada, de tal forma que o foco do olhar do condutor é transmitido em forma de vídeo. Isso permite mensurar quantas vezes o condutor detecta placas de trânsito da via, o instante e o intervalo de tempo em que isso acontece. Na figura 3, encontra-se uma foto de como o sistema de coordenadas é definido.

Figura 32: Sistema de rastreio do olhar



Por fim, o programa MAPPS foi utilizado para analisar o vídeo gerado pelo sistema de rastreio do olhar. Este software permite definir regiões de interesse (ROI) do cenário, demarcando a sinalização vertical ou pontos de interesse, para mensurar os tempos e duração da fixação do olhar do motorista para estes locais.

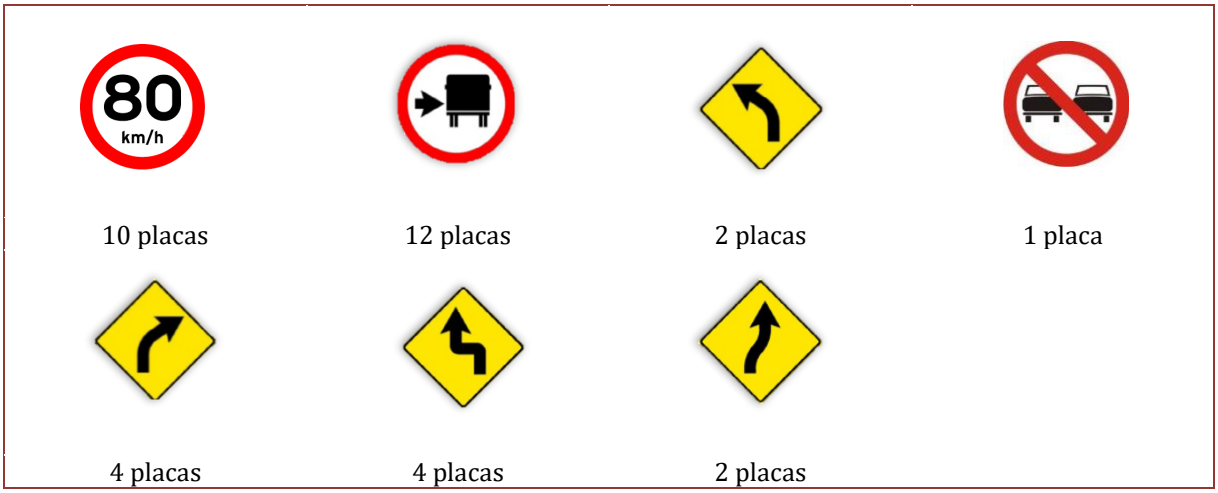
3.4. TRECHO EM ESTUDO

O cenário virtual utilizado na presente pesquisa corresponde a um trecho de aproximadamente 10 quilômetros de extensão de uma rodovia do Brasil.

O trecho em estudo apresenta um traçado sinuoso, com 20 curvas ao longo da extensão. Além disso, muitas dessas curvas possuem raios menores que 150 metros. No trecho em questão, a velocidade diretriz é 80 km/h, e a seção transversal da pista é composta por três faixas de rolamento, totalizando 10,50 metros de seção.

A sinalização do trecho inclui d35 placas (sem considerar os sinais de indicação de turismo), que estão divididas em sete categorias de sinais: advertência de curva simples à direita (A-2a) e à esquerda (A-2b), advertência de curva em 'S' à direita (A-5b), advertência de curva acentuada em "S" à esquerda (A-4a), sinal de limite de velocidade (R-19), sinal de veículos pesados à direita (R-27) , sinal de proibido ultrapassar (R-7). É de suma importância salientar a diferença no conceito de sinal e placa: o sinal é a informação transmitida ao condutor; a placa, por sua vez, é o elemento físico que apresenta o sinal (LAROCCA et al., 2018). Na Figura 4, encontram-se os seis tipos de sinais existentes no trecho.

Figura 33: Sinalização existente no trecho



As sinalizações de velocidade estão dispostas em pares em 5 locais ao longo da rodovia, estando uma à direita e outra à esquerda. Para facilitar a identificação, as placas foram nomeadas conforme o quilômetro em que se situam na rodovia e a posição delas no local (direita ou esquerda).

3.5. VARIÁVEIS DE ESTUDO

A seguir, estão as descrições mais detalhadas das variáveis coletadas no experimento (LAROCCA et al. (2018).

- Tempo de Observação: somatória de tempo de todas as fixações sobre o sinal;
- Tempo de Observação: somatória de tempo de todas as fixações sobre o sinal;
- Tempo de Fixação Máximo: duração da fixação mais longa sobre uma sinalização;
- Número de placas observadas: quantidade de sinalizações para as quais foram realizadas fixações superiores a 100 ms;
- Percentual de visualização: quociente entre a quantidade de condutores que perceberam o sinal e a quantidade total de condutores que participaram do experimento.

Há vários estudos que abordam as mudanças cognitivas conforme o envelhecimento. CANTIN et al. (2009) analisam como o processamento mental influencia no desempenho de diferentes faixas etárias na condução de um veículo. DRAG e BIELIAUSKAS (2010) defendem que a diminuição progressiva com a idade da atenção e da memória pode dificultar a operação em situações complexas, como dirigir um veículo.

Desse modo, além de analisar variáveis relacionadas a fixações em placas de sinalização, é pertinente para o presente estudo realizar uma avaliação da influência da atenção e memória do condutor, para verificar se há disparidades entre as faixas etárias. Para tanto, será aplicado um questionário sobre o nível de atenção e memória após cada voluntário completar o circuito.

3.6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.6.1. PERCURSO NO SIMULADOR DE DIREÇÃO

O treinamento prévio dos voluntários no simulador é uma prática recomendada e adotada em estudos com simulador de direção, antes da fase experimental da coleta de dados (STONER et al., 2011; RANGEL, 2015; LEDGER et al., 2019). Portanto, em seguida, o voluntário dirigia em um cenário de treinamento entre 5 e 10 minutos, a fim de adaptação aos controles do simulador de direção, e se sentisse apto à realização do experimento. Antes de iniciar o experimento, solicitou-se ao condutor que dirigisse normalmente.

3.6.2. QUESTIONÁRIO SOBRE O NÍVEL DE ATENÇÃO E MEMÓRIA

Baseando-se no questionário de COSTA et al. (2018) e HO et al. (2001), mas de forma adaptada, o voluntário após completar o percurso do experimento, foi convidado à responder um questionário em que deveria assinalar as sinalizações que se recordava durante a condução, bem como informar a velocidade permitida na via. Tal questionário continha imagens de 16 placas distintas, sendo que parte estava presente no percurso, e a outra parte não. O intuito era analisar a alteração da memória de curto prazo de acordo com a idade afeta o comportamento no trânsito (DRAG; BIELIAUSKAS, 2010).

3.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Primeiramente, foi realizada a análise descritiva dos resultados. Este tipo de análise tem como objetivo sintetizar uma série de valores de mesma natureza, permitindo que se tenha uma visão global de sua variação. Os dados foram sintetizados por meio de tabelas, gráficos e medidas descritivas, como medidas de posição e medidas de dispersão. Foram utilizados mapas de calor, como também, o gráfico de análise de componentes principais (PCA), para melhor representar as variáveis relacionadas ao tempo de fixação (ABDI; WILLIAMS, 2010).

Em relação à parte de inferência estatística, para as variáveis binomiais, foi utilizado o teste exato de Fisher para comparação de proporções. As variáveis de tempo de observação e tempo máximo de fixação foram submetidas ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Se possuíssem distribuição normal, seria realizado teste de ANOVA de duas vias (PADOVANI, 2014). Caso não os dados não possuíssem distribuição normal, era feita a análise não paramétrica por meio do Teste U de Mann-Whitney.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. QUESTIONÁRIO SOBRE O NÍVEL DE ATENÇÃO E MEMÓRIA

Analisando o resultado geral do questionário, constatou-se que o desempenho de ambos os grupos foi similar. O bom desempenho dos candidatos se deu, principalmente, por acertarem as placas que não estavam presentes no percurso.

Quanto ao limite de velocidade da via, 94 % dos voluntários do grupo de motoristas jovens conseguiram lembrar o valor (80 km/h), enquanto todos do grupo dos motoristas adultos foram capazes de responder corretamente. Quanto às outras sinalizações, a Tabela 2 mostra o desempenho de cada grupo no questionário aplicado.

Foi realizada a regressão linear dos dados e calculado o valor do coeficiente de correlação entre a taxa de acertos e a idade dos voluntários (R^2 = 0.1069; p = 0.1107 e ρ = -0.3488). Não foi possível estabelecer uma relação linear adequada, uma vez que tanto o coeficiente de correlação e o coeficiente de determinação resultaram em valores relativamente pequenos.

Em contrapartida, ao colocar uma placa de Proibido ultrapassar (R-7) propositalmente, mesmo se tratando de um trecho de rodovia duplicada, o desempenho dos candidatos foi bem abaixo da média,

principalmente dos motoristas adultos, em que apenas um voluntário constatou a presença da referida sinalização.

No grupo dos motoristas jovens, 53 % dos voluntários perceberam a placa de Proibido ultrapassar (R-7), enquanto, no grupo de motoristas adultos, essa frequência foi de 12,50%. Estatisticamente, observa-se uma diferença significativa $\alpha < 10\%$ e $p = 0,88$ no Teste Exato de Fisher. Pode ser um indício de que, mesmo sem ter certeza, o voluntário julgava intuitivamente, pelas características da via, qual a placa era mais provável de estar presente. Todos voluntários do grupo dos motoristas adultos possuem Carteira Nacional de Habilitação (CNH) há mais de 20 anos, o que reforça a hipótese de que a experiência dos voluntários adultos possibilitou uma previsão das sinalizações da via.

Tabela 18: Percepção dos grupos no questionário

Questionário			Resultados	
Sinalização	Ícone	Nº de vezes presente na via	Acertos (%) Motoristas Jovens	Acertos (%) Motoristas Adultos
Parada Obrigatória		Nenhuma	94,12	100
Proibido Estacionar		Nenhuma	100	100
Curva à direita		4	100	87,5
Curva à esquerda		2	100	87,5
Ônibus, caminhões e veículos de grande porte mantenham-se à direita		12	94,12	100
Proibido mudar de faixa ou pista de trânsito da direita para esquerda		Nenhuma	94,12	100
Área escolar		Nenhuma	100	100
Proibido trânsito de caminhões		Nenhuma	100	100
Mão dupla adiante		Nenhuma	100	100
Área com desmoronamento		Nenhuma	100	100
Curva acentuada em “S” à esquerda		2	94,12	100
Curva em “S” à direita		2	82,35	87,5
Trânsito de pedestres		Nenhuma	100	100
Cruzamento de vias		Nenhuma	100	87,5
Proibido ultrapassar		1	52,94	12,5
Pista escorregadia		Nenhuma	94,12	75
Média Geral			94,12	89,06

4.2. NÚMERO DE PLACAS DE VELOCIDADE PERCEBIDAS POR CADA CONDUTOR

Na Tabela 3, encontra-se o número de voluntários de cada grupo que visualizou cada sinalização de velocidade, bem como os respectivos valores de percentual de visualização.

O desempenho individual foi plotado em um gráfico de dispersão (Figura 5). Ademais, foi calculado o valor do coeficiente de correlação entre o número de placas percebidas por cada voluntário e a idade. O valor do coeficiente de correlação obtido foi insignificante (ρ = 0.268).

Pelo diagrama de caixa (Figura 6), observa-se que há uma tendência de os motoristas adultos visualizarem uma maior quantidade de sinalizações de velocidade. Para comprovar essa hipótese, foi realizado o Teste U de Mann-Whitney (U1 = 90, U2 = 30, Ucrítico = 33 e p = 10%). Assim, verifica-se que estatisticamente essa diferença é significativa.

Tabela 3: Quantidade de voluntários de cada grupo que percebeu cada sinalização de velocidade e o respectivo percentual de visualização

	Motoristas Jovens		Motoristas Adultos	
Sinalização	Nº de voluntários que percebeu o sinal	Percentual de visualização	Nº de voluntários que percebeu o sinal	Percentual de visualização
km 5 Direita	11	73.33%	7	87.50%
Km 5 Esquerda	8	53.33%	2	25.00%
km 10 Direita	11	73.33%	7	87.50%
km 10 - Esquerda	4	26.67%	2	25.00%
km 15 - Direita	9	60.00%	7	87.50%
km 15 - Esquerda	3	20.00%	2	25.00%
km 20 - Direita	5	33.33%	7	87.50%
km 20 - Esquerda	7	46.67%	3	37.50%
km 25 - Direita	7	46.67%	7	87.50%
km 25 – Esquerda	9	60.00%	6	75.00%

Figura 5: Gráfico de dispersão dos desempenhos individuais

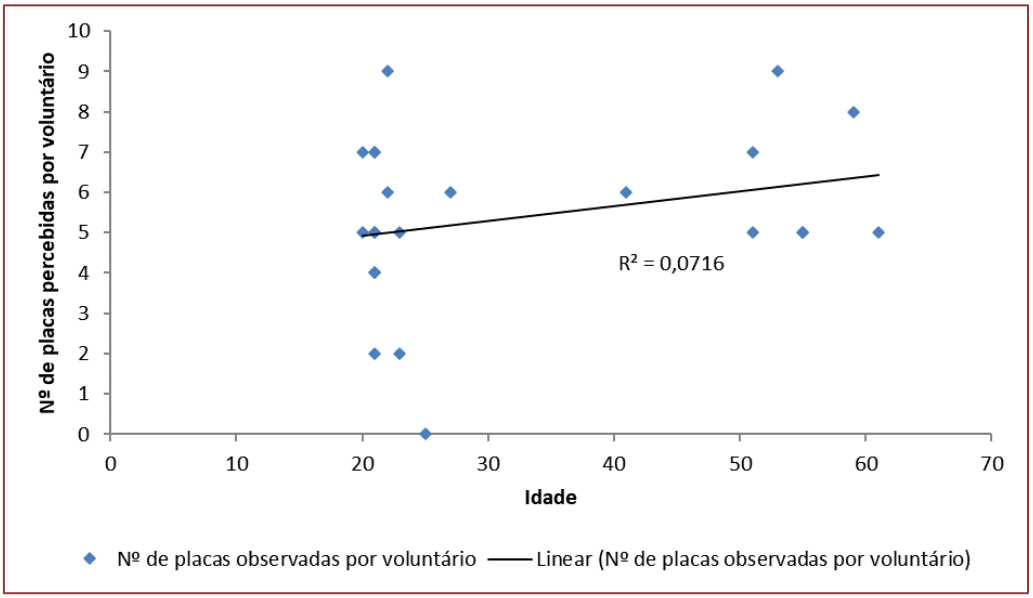
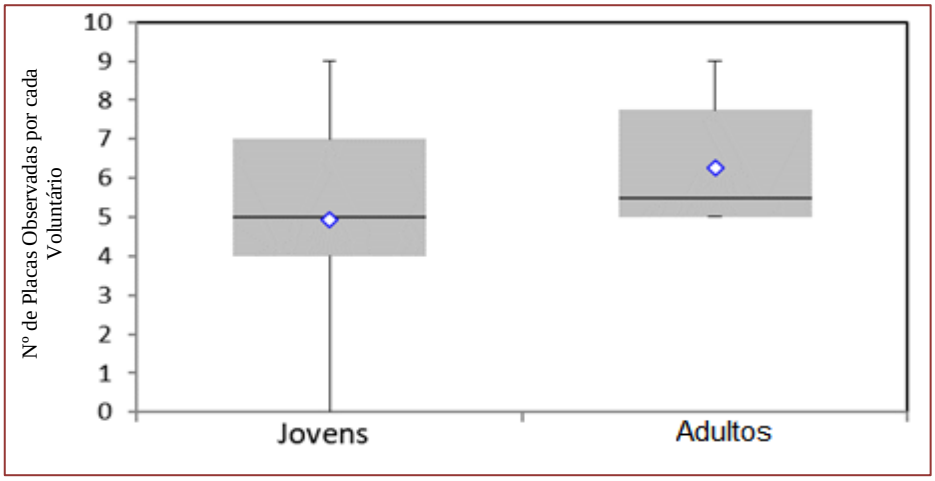


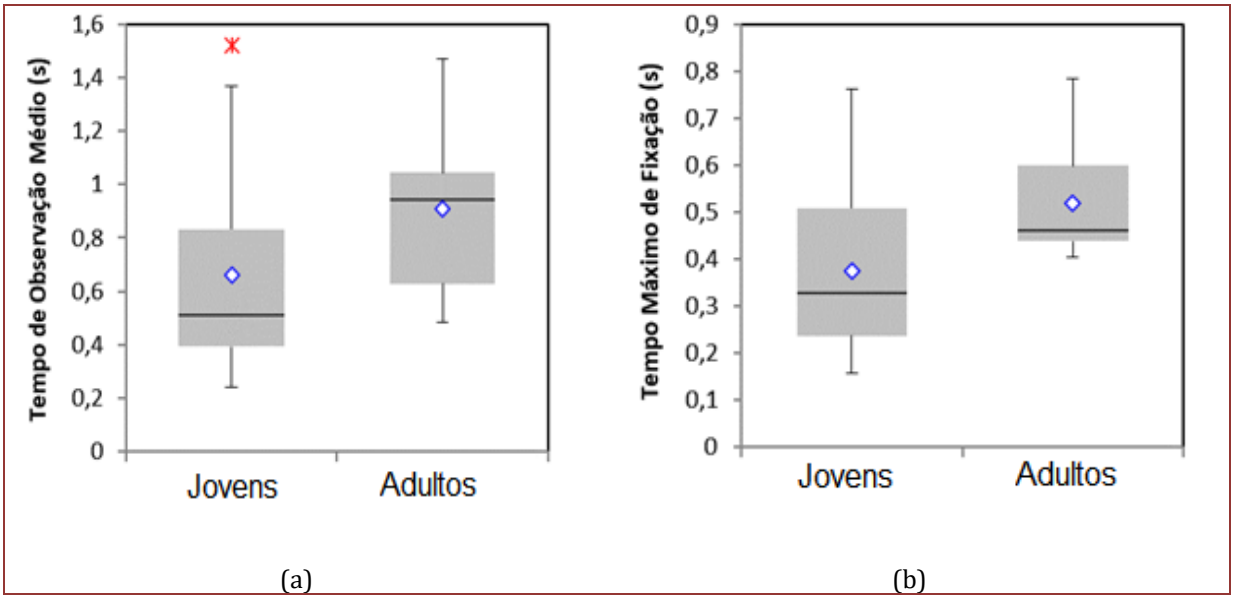
Figura 6: Diagrama de Caixa do Número de Placas Observadas



4.3. TEMPO DE OBSERVAÇÃO E TEMPO MÁXIMO DE FIXAÇÃO EM PLACAS DE VELOCIDADE

Para análise da estatística descritiva, construíram-se diagramas de caixa (Figura 7) para realizar uma avaliação inicial dos resultados. Para tanto, foram considerados o tempo máximo de fixação e o tempo de observação médio, o qual foi calculado como a média dos tempos de observação de todas as sinalizações de velocidade visualizadas por cada voluntário.

Figura 7: (a) Diagrama de Caixa do Tempo de Observação Médio e (b) Diagrama de Caixa do Tempo Máximo de Fixação.



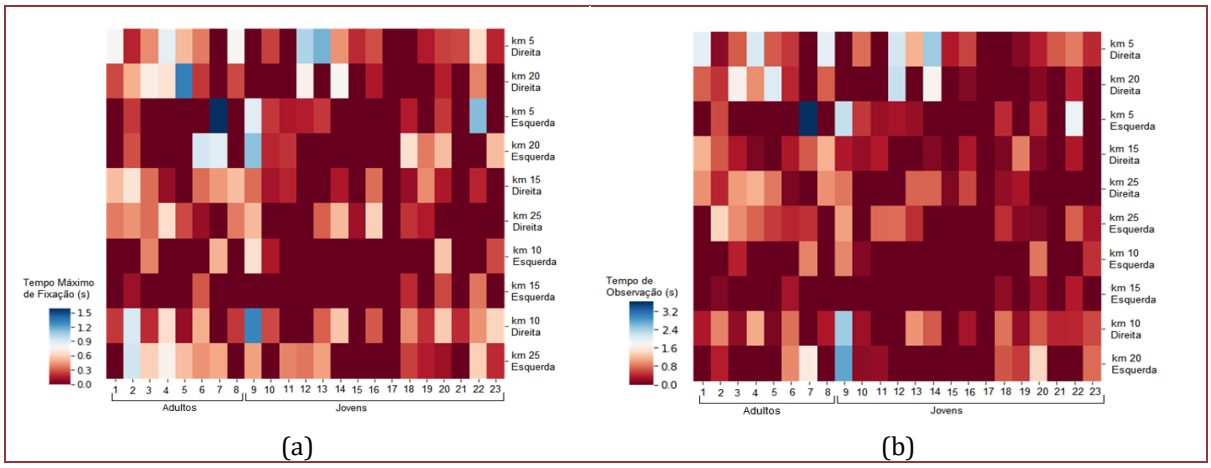
(a) (b)

Observa-se, por meio do diagrama de caixa, que há uma tendência de o tempo de observação para cada sinalização de velocidade ser maior para os motoristas adultos. É de suma importância destacar que não foi considerado o valor do tempo de observação para voluntários que não tiveram fixações maiores que 100 ms em nenhuma placa de velocidade.

O desempenho dos grupos também foi representado por meio de gráficos de heatmaps (Figura 8). Os gráficos de heatmap foram produzidos com o pacote Seaborn na linguagem de programação Python 3, interface Jupyter. A função utilizada foi seaborn.clustermap(). Nos gráficos, os voluntários do grupo II estão representados à esquerda (1-II a 8-II), e os do grupo I, à direita (9-I a 23-I). Quanto mais azul, mais tempo durou a fixação do voluntário na placa, e quanto mais vermelho, menos tempo. Os valores claros indicam intermediário.

Nos gráficos, os voluntários do grupo dos motoristas adultos estão representados à esquerda (1 a 7), e os do grupo dos motoristas mais jovens, à direita (9 a 23). Quanto mais azul, maior o tempo de duração da fixação do voluntário na placa, e quanto mais vermelho, menor o tempo. Tons claros indicam intermediário.

Figura 8: (a) Mapa de calor do tempo máximo de fixação e (b) Mapa de calor do tempo de observação em cada placa

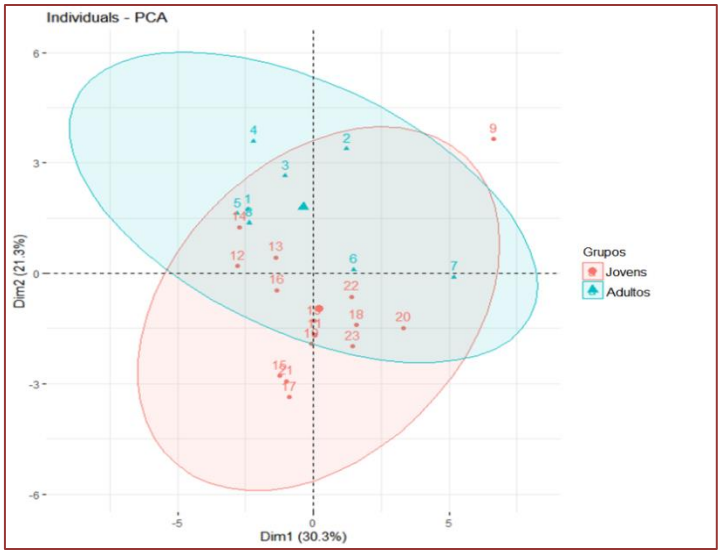


(a) (b)

Além disso, foram usados métodos de estatística multivariável para facilitar a interpretação dos dados. Foi feita uma análise dos componentes principais (PCA). O PCA foi realizado considerando os valores de tempo de observação e tempo máximo de fixação para cada uma das sinalizações visualizadas por cada um dos voluntários.

Na Figura 9, os pontos correspondem aos voluntários. Em rosa, estão representados os indivíduos pertencentes ao grupo dos motoristas do Grupo I e, em azul, os indivíduos pertencentes ao grupo dos motoristas do Grupo II. As duas dimensões representam toda a variação das amostras, considerando todas as variáveis. Pela análise gráfica, pode-se constatar que os voluntários 15 e 21 tiveram resultados muito parecidos, pois seus pontos estão próximos. Já o voluntário 9 é diferente do voluntário 17, pois estão mais longe. A observação do diagrama de caixa indicou que, pelo PCA, o voluntário 9 é um outlier do grupo dos motoristas jovens.

Figura 9: Análise de Componentes Principais das Variáveis Relacionadas ao Tempo de Fixação (Tempo de Observação e Tempo Máximo de Fixação)



Apesar de os círculos estarem parcialmente sobrepostos, há um indício de agrupamento, isto é, há uma maior semelhança entre os resultados de voluntários pertencentes ao mesmo grupo.

Em seguida, testaram-se se os dados possuíam distribuição normal através do teste de Shapiro Wilk. Os valores-p foram ajustados pelo método de Holm, que serve para evitar falsos positivos. Os dados analisados foram o tempo de observação em cada placa, e o tempo máximo de fixação em cada placa. A Tabela 4 mostra os valores-p desses testes.

Tabela 4: Resultados do Teste de Shapiro Wilk

Valor-p		
	Tempo de Observação	Tempo Máximo de Fixação
km 5 - Direita	0.004	0.047
km 5 - Esquerda	0.000*	0.000*
km 10 - Direita	0.002	0.047
km 10 - Esquerda	0.000	0.000*
km 15 - Direita	0.003	0.047
km 15 - Esquerda	0.000*	0.000*
km 20 - Direita	0.000*	0.000*
km 20 - Esquerda	0.000*	0.000*
km 25 - Direita	0.003	0.019
km 25 – Esquerda	0.011	0.047

*p<0,001

Todos os valores-p são abaixo de 0.05, portanto consideramos que os dados possuem distribuição não-normal. Isso inibe a realização de um teste ANOVA de duas vias para inferir se existe distinções entre os grupos.

Dessa forma, realizou-se uma análise não paramétrica, avaliando o tempo de observação médio apenas. Pelo Teste U de Mann-Whitney (U1 = 83, U2 = 29, Ucrítico = 31 e p = 10%), verifica-se que estatisticamente essa diferença é significativa.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como principal objetivo analisar a influência da idade no desempenho dos motoristas, por meio de testes realizados em ambientes simulados de direção. Para tanto, foram coletados dados por meio do sistema de rastreio de olhar *SmartEye* e através de aplicação de questionário. Em termos gerais, não houve grandes disparidades entre o grupo dos motoristas jovens e o grupo dos motoristas adultos.

Quanto à aplicação do questionário, que avaliou o nível de atenção, o desempenho dos candidatos, no geral, foi bem elevado, com uma taxa de acertos, no Questionário Pós-condução no Simulador, acima de 94% do grupo dos motoristas jovens e acima de 89% do grupo dos motoristas adultos. Todavia, ao analisar a sinalização de proibido ultrapassar que, intuitivamente, não estaria presente em um trecho de rodovia duplicada, o desempenho de ambos os grupos foi evidentemente inferior à média de acertos. Isso indica que os motoristas tendem a usar a experiência para prever as sinalizações de uma via, ou seja, os voluntários assinalaram o que julgavam ser mais coerente ao invés de focarem em sua experiência no cenário.

O grupo dos motoristas adultos obteve resultados mais satisfatórios quanto ao percentual de visualização em relação à sinalização de velocidade, o que pôde ser verificado por testes estatísticos não paramétricos. Isso foi ao encontro dos estudos de PRADHAN et al. (2005), já que os resultados da presente pesquisa também mostram que os condutores adultos têm maior facilidade para encontrar visualmente elementos do cenário importantes para adquirir informações.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob a bolsa 2018/12547-8 e pelo CNPq, fomento pelo processo 307772/2019-5.

Os autores agradecem a todos voluntários que se dispuseram a participar da pesquisa e aos funcionários da Seção Técnica de Informática (STI) da Escola de Engenharia de São Carlos.

REFERÊNCIAS

[1] Abdi, H. e L. J. Williams (2010) Principal component analysis. WIREs Computational Statistics , v. 2, n. 4, p. 433–459.

[2] Ayuso, M.; R. Sánchez e M. Santolino (2020) Does longevity impact the severity of traffic crashes? A comparative study of young-older and old-older drivers. Journal of Safety Research, v. 73, p. 37–46..

[3] Baldock, M. R. J.; J. Mathias; J. Mclean e A. Berndt (2007) Visdual attention as a predictor of on-road driving performance of older drivers. Australian Journal of Psychology, v. 59, n. 3, p. 159–168.

[4] Becker, J. e T. Ngo (2016) Mitigating Visually-Induced Motion Sickness in Virtual Reality. Course Project for EE267: Virtual Reality at Stanford University. Stanford University, p. 1–4.

[5] Cantin, V.; M. Lavallière; M. Simoneau e N. Teasdale (2009) Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity. Accident Analysis and Prevention, v. 41, n. 4, p. 763–771.

[6] Rangel, M. A. C. (2015) Análise da percepção da sinalização vertical por parte do condutor, utilizando ambientes simulados de direção: um estudo de caso na rodovia BR-116. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo.

[7] Chen, F.; M. Song e X. Ma (2019) Investigation on the injury severity of drivers in rear-end collisions between cars using a random parameters bivariate ordered probit model. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 16, n. 14.

[8] Clarke, D. D.; P. Ward; C. Bartle e W. Truman (2006) Young driver accidents in the UK: The influence of age, experience, and time of day. Accident Analysis and Prevention, v. 38, n. 5, p. 871–878.

[9] Costa, M.; A. Simone; V. Vignali; C. Lantieri e N. Palena (2018) Fixation distance and fixation duration to vertical road signs. Applied Ergonomics, v. 69, p. 48–57.

[10] Datatran (2019). Banco de dados abertos de acidentes de trânsito da Polícia Rodoviária Federal.

[11] DeLucia, P. R.; M. K. Bleckley; L. E. Meyer e J. M. Bush (2003) Judgments about collision in younger and older drivers. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 6, n. 1, p. 63–80.

[12] DETRAN-ES (2010) Departamento Estadual de Trânsito do Espirito Santo, Vitória, ES.

[13] Drag, L. L. e L. A. Bieliauskas (2010) Contemporary review 2009: Cognitive aging. Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology.

[14] Erel, H. e D. A. Levy (2016) Orienting of visual attention in aging. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, v. 69, p. 357–380.

[15] He, W.; D. Goodkind e P. Kowal (2016) An Aging World : 2015 International Population Reports. U.S. Government Publishing Office, Washington, DC.

[16] Ho, G.; C. T. Scialfa; J. K. Caird e T. Graw (2006) Visual Search for Traffic Signs: The Effects of Clutter, Luminance, and Aging. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, v. 43, n. 2, p. 194–207.

[17] Hosseini, M.; S. Farahani; M. A. Ghahraman; S. Jalaie e S. Khademi (2015) Vestibular findings in motion sickness. Auditory and Vestibular Research, v. 24, n. 3, p. 11–18.

[18] Isler, R. B.; N. J. Starkey e P. Sheppard (2011) Effects of higher-order driving skill training on young, inexperienced drivers' on-road driving performance. Accident Analysis and Prevention, v. 43, n. 5, p. 1818–1827.

[19] Larocca, A. P. C.; R. L. Ribeiro, A. da Cruz Figueira; P. T. M. E. S. de Oliveira; L. C. Lulio e M. A. C. Rangel (2018). Analysis of perception of vertical signaling ofhighways by drivers in a simulated driving environment. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 58, 471–487.

[20] Ledger, S.; J. M. Bennett; E. Chekaluk e J. Batchelor (2019) Cognitive function and driving: Important for young and old alike. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 60, p. 262–273.

[21] Lutz, W.; W. Sanderson e S. Scherbov (2008) The coming acceleration of global population ageing. Nature, v. 451, n. 7179, p. 716–719.

[22] Nguyen-Phuoc, D. Q.; C. De Gruyter; O. Oviedo-Trespalacios; D. N. Su e A. T. P. Tran (2020) Turn signal use among motorcyclists and car drivers: The role of environmental characteristics, perceived risk, beliefs and lifestyle behaviours. Accident Analysis and Prevention, v. 144, n. April. 451, n. 7179, p. 716–719.

[23] Oviedo-Trespalacios, O.; A. P. Afghari e M. M. Haque (2020) A hierarchical Bayesian multivariate ordered model of distracted drivers' decision to initiate risk-compensating behaviour. Analytic Methods in Accident Research, v. 26, p. 100121.

[24] Oviedo-Trespalacios, O. e B. Scott-Parker (2018) The sex disparity in risky driving: A survey of Colombian young drivers. Traffic Injury Prevention, v. 19, n. 1, p. 9–17.

[25] Padovani, C. R. (2014) Delineamento de Experimentos. 1. ed. São Paulo: Editora UNESP.

[26] Palumbo, A. J.; M. R. Pfeiffer; K. B. Metzger e A. Curry (2019) E. Driver licensing, motor-vehicle crashes, and moving violations among older adults. Journal of Safety Research, v. 71, p. 87–93.

[27] Pradhan, A. K.; K. R. Hammel; R. DeRamus; A. Pollatsek; D. A. Noyce e L. F. Fisher (2005) Using Eye Movements To Evaluate Effects of Driver Age on Risk Perception in a Driving Simulator. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, v. 47, n. 4, p. 840–852.

[28] Ross, V.; E. M. M. Jongen; K. Brijs; T. Brijs e G. Wets (2016) Investigating risky, distracting, and protective peer passenger effects in a dual process framework. Accident Analysis and Prevention, v. 93, p. 217–225.

[29] Venkatakrishnan, R.; A. Bhargava; R. Venkatakrishnan; K. M. Lucaites; M. Volonte; H. Solini; A. C. Robb; C. Pagano e S. V. Babu (2019) Towards an Immersive Driving Simulator to Study Factors Related to Cybersickness. 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 23-27 p. 1201–1202.

[30] WHO (2018) Global status report on road safety. World Health Organization, Geneva, Switzerland.

[31] Wong, I. Y.; S. S. Smith e K. A. Sullivan (2018) Validating an older adult driving behaviour model with structural equation modelling and confirmatory factor analysis. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, v. 59, p. 495–504.

Autores

AUTORES

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ADRIANA YUMI SATO DUARTE

Possui graduação (2009) em Bacharelado em Têxtil e Moda pela Universidade de São Paulo, Mestrado (2013) e Doutorado (2017) em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas. Realizou um período de Estágio de Doutorado Sanduíche no Exterior (SWE) - Programa Ciência sem Fronteiras (2015-2016) no Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (Dik), Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica com ênfase em Projeto Mecânico e na área de Têxtil e Moda com ênfase em sustentabilidade, atuando em ensino e pesquisa nos seguintes temas: metodologia de projeto de produto, desenvolvimento de produto sustentável, fibras naturais brasileiras e Indústria 4.0. Atualmente é Professora Assistente II do Centro Universitário No. Sra. do Patrocínio (Ceunsp) e Coordenadora dos Cursos de CST em Design de Moda e CST em Design Gráfico.

ADRIANO BRESSANE

Bacharelado em Engenharia Ambiental. Mestrado em Engenharia Urbana. Doutorado em Ciências Ambientais. Pós-doutorado em Engenharia Urbana. Professor Universitário

ALESSANDRO JOSÉ GOMES DOS SANTOS

Doutor em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia-PRODERNA/UFPA.

ANA CAROLINA RAMOS DA SILVA

Graduanda em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Pará-UFPA.

ANA PAULA CAMARGO LAROCCA

Professora Associada no curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. É Engenheira Civil formada pela Universidade de São Paulo (Escola de Engenharia de São Carlos, 1997), mestrado em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo (1999), Doutorado em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo (2004) - doutorado sanduíche, pela University of New Brunswick, Canadá (2003). Realizou cursos de aperfeiçoamento na TU Delft; 2015, na University of Iowa, 2019; na University of Wisconsin-Madison, 2021 (remoto) e realizou pós-doutorado em Transportes pela University of Central Florida, em 2017, sob a supervisão do Professor Mohamed Abdel-Aty. É bolsista de Produtividade em Pesquisa Nível 1D do CNPq. Colaborou com a EESC-USP como Presidente da Comissão de Gestão Estratégia, de agosto de 2016 até 2019); como Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC-USP de 2017 até 2020, como Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da EESC-USP de 2016 até 2020. Obteve financiamento para desenvolvimento de pesquisas junto ao CNPq, CAPES, FAPESP, ANTT, grupo ARTERIS.

ANDRÉ WILSON DA CRUZ REIS

Doutorando em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia-PRODERNA/UFPA.

AUTORES

ARYANE MARIA DE OLIVEIRA LIMA

Engenheira Química especializada em Engenharia Econômica, com forte experiência em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e processos e em elaboração e implementação de projetos industriais em grande grupo de empresas químicas e petroquímicas.

AURENICE CRUZ FIGUEIRA

Analista em Segurança Viária na Concessionária de Rodovias EixoSP e Professora no curso de MBA em Infraestrutura de Transportes na PUC Minas. É Doutora em Engenharia de Transportes pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), 2019; Mestre em Engenharia de Transportes pela Escola Politécnica da USP, 2012; Tecnóloga em Processamento de Dados (UFPA), 1998; Especialista em Geoprocessamento (Ulbra), 2005 e graduada em Engenheira Civil (Unicep), 2021.

CARLOS CÁSSIO DE ALCÂNTARA

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2015), com período sanduíche na Euskal Herriko Unibertsitatea (2012/2013); Especialista em Engenharia Elétrica com Ênfase Sistemas de Automação pela Universidade Cândido Mendes (2017). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2017). Tem experiência na área de Metalurgia Física com ênfase em transformações de fase no estado sólido. Atua principalmente nos seguintes temas: Ligas com Memória de Forma; Transformações Martensíticas; Crescimento Anormal de Grão.

CASSIO ROBERTO MACEDO MAIA

Bacharel em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1975), Mestre em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo (1978) e Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2003). Atualmente é Professor Assistente Doutor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Tem experiência na área de Ciências Térmicas, com ênfase em Transferência de Calor, atuando principalmente nos seguintes temas: métodos analíticos-numéricos, transferência de calor, refrigeração, energias renováveis e sistemas de geração e cogeração de energia.

DANIEL NICOLAU LIMA ALVES

Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2017), Especialização no setor de Petróleo e Gás (ANP-PRH 54/UFPB), Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2015). Participou como bolsista do programa ANP-PRH 54 na área de Petróleo e Gás. Áreas de interesse: Sólidos Mecânicos, Mecânica da Fratura, Análise Estrutural, Soldagem, Projetos Mecânicos, Análise Numérica, Ligas com Memória de Forma (LMF).

DEIBSON SILVA DA COSTA

Doutor em Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia-PRODERNA/UFPA. Docente no Curso de Engenharia de Materiais na Universidade Federal do Pará-UFPA.

DORIVANE COHEN FARIAS

Graduada em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Pará-UFPA. Graduanda em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará-IFPA. Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC/UFPA.

AUTORES

EDSON DE PAIVA ALVES

Engenheiro Químico formado pela Escola Politécnica da USP, com mestrado em Energia pela Universidade Salvador (UNIFACS), com pós-graduação em Administração de Empresas pela FGV e MBA em Comércio Internacional pela UNIFACS. Atualmente é Diretor de Estratégia, Inovação e Desenvolvimento de Negócios no grupo Unigel.

FABIO DALMAZZO SANCHES

Professor adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Engenharia de Produção e Engenharia Mecânica, com ênfase em mecânica dos sólidos. Principais áreas de atuação: vibrações e detecção de falhas em máquinas, manutenção preditiva, modelagem de sistemas dinâmicos rotativos.

FELIPE BRAGA FRANCO

Engenheiro de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) de Rio das Ostras-RJ.

FERNANDO NUNES BELCHIOR

Graduado em 2000 em Engenharia Elétrica, na Área de Sistemas Elétricos de Potência, na Universidade Federal de Uberlândia, UFU-MG, onde também recebeu o título de Mestre em 2003 e Doutor em 2006 em Engenharia Elétrica. De fev/2007 a dez/2015 foi professor associado na Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI-MG. Atualmente trabalha como professor associado na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Federal de Goiás (UFG), no campus avançado de Aparecida de Goiânia-GO. Suas principais áreas de interesse englobam: Qualidade da Energia Elétrica, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência, Medições Elétricas e Geração Distribuída, principalmente geração de energia solar fotovoltaica.

FLÁVIO SILVA MACHADO

Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense (UFF), do Departamento de Engenharia (REG), do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) de Rio das Ostras-RJ. Pesquisador do Laboratório de Engenharia de Materiais, Manutenção e Meio ambiente (L3MA). Graduação em Licenciatura Matemática pela Fundação Educacional Rosemar Pimentel (2000), graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense (1991), Mestrado e Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (2002 e 2009). Experiência nas áreas de Engenharia de Materiais/Metalúrgica e Meio Ambiente, com ênfase em Gestão Ambiental, Energias Renováveis e Resíduos Industriais. Atuando principalmente nos seguintes temas: Energias Renováveis, Gestão Ambiental, Manutenção e Resíduos Industriais e Urbanos.

FRANCISCO ELTON CESAR JUNIOR

Discente de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas

GABRIEL DA SILVA GOMES

Graduado em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Pará-UFPA. Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC/UFPA.

GIULIANA MORETI BATISTA

Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) de Rio das Ostras-RJ.

AUTORES

GRAZIELE DAIANA SENA DE SOUSA

Formada em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA, 2020). Atualmente cursando Engenharia Física na UFOPA. Possui experiência nas área de estudo de filmes finos em processos de fotocatálise e nas áreas de programação básica em FORTRAN e Python relacionadas a Métodos Numéricos. Atualmente com ênfase na área de Depleção de combustível nuclear.

GREICIARA GONÇALVES DOS SANTOS

Graduanda em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, nos últimos anos tem conciliado a graduação com os estágios. Recentemente tem atuado com métodos ágeis, mapeamento de processos, criação de fluxogramas e melhoria de processos.

GUILHERME JOÃO MUSSE NETO

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal da Bahia (2018), especializado em Gestão estratégica de negócios pela Universidade (2021) e mestrando no programa de pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia. Atua na área de sustentabilidade e mitigação de impactos ambientais.

IZABELA SILVA FREITAS

Graduada em Engenharia Química pela Universidade Salvador (2017) e mestranda no programa de pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal da Bahia. Atua na área de pesquisa e desenvolvimento em indústria petroquímica.

JANINE CAVALCANTE DE OLIVEIRA

Bacharela em Engenharia Física pela Universidade Federal de Goiás. Mestranda em Engenharia de Produção, com ênfase em Gerenciamento de Energia Elétrica e Eficiência Energética. Atua no setor de energia desde 2019, elaborando projetos elétricos, propostas e dimensionamento sistemas de energia solar fotovoltaica, e estudos de viabilidade de autoprodução solar no ambiente comercial livre.

JOÃO DE ALMEIDA MELO FILHO

Doutor em Engenharia Civil na área de Estruturas e Materiais. Professor associado da Universidade Federal do Amazonas. Atualmente em pós-doutorado no ITA.

JOÃO VITOR BAPTISTA SALGADO

Graduado em Engenharia dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (IME).

JOÃO VITOR FERREIRA ARAUJO

Bacharel em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Goiás em 2021. Atua no setor bancário desde 2020.

JOSÉ EDUARDO FERNANDES STORT

Possui graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, pela Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI-MG (2013). Atualmente é Engenheiro Eletricista da Diretoria de Obras do Tribunal de Justiça do Estado de Goiás, desempenhando as seguintes funções: elaboração de projetos, termos de referência e planilhas orçamentárias, acompanhamento e fiscalização de obras, gestão de contratos, elaboração de relatórios e pareceres técnicos. Possui

AUTORES

especialização em Telecomunicações, com ênfase em Prédios Inteligentes, pelo IFG (2018). É aluno de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFG.

JOSE LEOMAR FERNANDES

Bacharelado em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia de Transportes. Doutorado em Engenharia de Transportes. Professor Universitário

JOSÉ LUIS DOMINGOS

Possui mestrado (1998) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2003). Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG desde 1992. Atua na área de Eficiência Energética e Energias de Renováveis (Energia Solar Fotovoltaica) e tem formação e interesse na área de acionamentos de máquinas a relutância variável. Integra o quadro de professores efetivos do Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG. Atuou em gestão como Coordenador do Curso Técnico em Telecomunicações, Coordenador de Pesquisa e Pós-Graduação, Gerente de Extensão e Gerente de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão do Campus Goiânia do IFG.

JOSÉ RAIMUNDO RABELO FILHO

Possui graduação em Engenharia Civil (2017) e Geografia (2002) pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Geotécnica (2019). Trabalha na área ambiental no âmbito da mineração, indústria e obras civis com ênfase em saneamento (água, drenagem, esgoto, barragem e resíduos sólidos), materiais de construção, pavimentação, portos e aeroportos.

JOSE RICARDO GABRIEL KUNIYOSHI

Engenheiro Civil formado pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

LARISSA TAVARES ESQUERDO

Graduada em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Pará-UFPA.

LENILSON MOREIRA ARAÚJO

Doutor em ENGENHARIA NUCLEAR na área de pesquisa Física de Reatores pela Universidade Federal do Rio de Janeiro(2015). Mestre em ENGENHARIA NUCLEAR pelo Instituto Militar de Engenharia (2011). Possui graduação em LICENCIATURA PLENA EM MATEMÁTICA pela Universidade Federal do Pará (2007). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA). Tem experiencia na área de Física de Reatores com ênfase em Modelagem Computacional. Atuando principalmente nos seguintes temas: Detecção de antineutrinos em reatores nucleares térmicos, Depleção de combustível nuclear, Difusão e Transporte de Nêutrons, Ordenadas Discretas e Método dos Elementos Finitos.

LEONARDO QUEIROZ MOREIRA

Possui graduação em Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade Federal de São João Del-Rei (2003), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2007) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2011). Atualmente é professor da Universidade Federal de Goiás. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecânica dos Fluídos, atuando principalmente nos seguintes temas: fourier pseudo-spectral method, immersed boundary method, computational fluids dynamic, método pseudo espectral de fourier e turbulent flow.

AUTORES

LUIS MIGUEL GUTIÉRREZ KLINSKY

Bacharelado em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia de Transportes. Doutorado em Engenharia de Transportes

LUIZ ANTÔNIO MAGALHÃES PONTES

Possui graduação em Engenharia Química (EQ) pela EQ/UFRJ (1981), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ (1984) e doutorado em EQ pela FEQ/UNICAMP (1997). Foi presidente do Centro de Inovação e Tecnologia da petroquímica Unigel e engenheiro e gerente de P&D da Braskem (ex-Copene) por 13 anos. Foi professor titular na Universidade Salvador (Unifacs) atuando como Pró-reitor de Pós-graduação, Pesquisa e Extensão por 11 anos e diretor geral da Fundação Escola Politécnica FEP/UFBA de 2017 a 2020. É presidente do Instituto Brasileiro de Tecnologia e Regulação - IBTR. Atualmente é Professor Associado na EQ da Universidade Federal da Bahia, dedicação exclusiva. É professor e orientador no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química UFBA/Unifacs - PPEQ.

LUIZ PAULO MENDONÇA BRANDÃO

Professor Titular, Decano e Assessor de Ensino e Pesquisa do Comando do Instituto Militar de Engenharia. Engenheiro Metalúrgico pela UFF, MSc em Ciência dos Materiais pelo IME, DSc em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ. Tem experiência na área de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, com foco em Propriedades Físicas de Metais e Ligas, atuando principalmente nos seguintes temas: textura, microestrutura, textura, microestrutura e análise microestrutural.

MARCUS GODOLPHIM DE CASTRO NEVES

Engenheiro Mecânico graduado pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB, MS), Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP, SP), com ênfase na área de Energia e Sistemas Térmicos. Atualmente é Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE - UFRJ) e bolsista do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Possui experiência em ensino, pesquisa e busca de documentos para pedidos de patentes, além de atuar nas áreas de Projeto de Máquinas, Tribologia, Termodinâmica, Transferência de Calor e Geração e Cogeração de Energia.

MARIA APARECIDA FERNANDES ALMEIDA

Graduada em Engenharia Industrial Elétrica, Mestre e Doutora em Engenharia Elétrica, Mestre e Doutora em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). É professora nos departamentos de Engenharia de Produção e Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). Atua nas áreas de simulação de sistemas de produção e Building Information Modeling (BIM).

MARIA CLARA DE SOUZA RODRIGUES

Engenheira de Produção pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Atua com os levantamentos quantitativos de projetos além da elaboração de orçamentos de obras.

MARIA HELENA TEIXEIRA DA SILVA

Professora Adjunta da Universidade Federal Fluminense (UFF), do Departamento de Engenharia (REG), do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) de Rio das Ostras-RJ. Pesquisadora do Laboratório de Engenharia de Materiais, Manutenção e Meio ambiente (L3MA). Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1982), mestrado em Engenharia de Produção (1994) e doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação (2002) ambos pela Coordenação dos Programas de Pós Graduação em Engenharia da UFRJ (COPPE/UFRJ). Leciona disciplinas nas seguintes áreas de conhecimento: Metodologia da Pesquisa Científica, Propriedade

AUTORES

Intelectual, Redação Científica e Ética. De 2004 a 2013 atuou como diretora do Escritório de Transferência de Conhecimento (Etco), setor responsável pela gestão da propriedade intelectual da UFF.

MASOUD GHANBARI KASHANI

Engenheiro Mecânico graduado pelo Islamic Azad University of Kashan (IAUK) Irã, mestrado em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ com pesquisa voltada para termoeconomia e impacto ambiental. Atualmente é doutorando em Engenharia Mecânica na UNESP de Ilha Solteira. Possui experiência em ensino, bem como na área de engenharia mecânica, com ênfase em termociências, otimização e controle preditivo nos sistemas térmicas.

MATEUS CARVALHO AMARAL

Professor Adjunto da Universidade Federal Fluminense (UFF), do Departamento de Engenharia (REG), do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) de Rio das Ostras-RJ. Pesquisador do Laboratório de Engenharia de Materiais, Manutenção e Meio ambiente (L3MA). Doutor em Engenharia e Ciências dos Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais pela UENF. Graduado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UENF. Experiência na área de tecnologia, manutenção, inspeção e reparo de dutos rígidos e flexíveis submarinos.

MAURY VIEIRA DE OLIVEIRA

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (2008). Pós graduado em Engenharia das Estruturas pela Universidade Estácio de Sá, polo de Cabo Frio RJ (2020). Pós graduado em Engenharia Geotécnica pela Faculdade Unyléya (2020). Mestrando do curso de Ciências e Tecnologia de Materiais na Universidade Estadual do Rio de Janeiro UERJ, polo de Nova Friburgo RJ.

MAYCON DOUGLAS DE OLIVEIRA CASTRO

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário do Norte (UNINORTE). Possuí experiência em Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto, Drones, Bancos de Dados Geográficos e Interpretação de Dados Hidrológicos. Atualmente sou Chefe do Núcleo de Geoprocessamento e Gestão de Florestas na Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SEMA/AM.

MIRELA BEATRIZ SILVA

Bacharelado em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental

MÔNICA CALIXTO ANDRADE

Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, (1999). Professor adjunto do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro da Universidade Estadual do Rio de Janeiro - Nova Friburgo - RJ, Brasil - IPRJ/UERJ.

NAYLA GONÇALVES DA SILVA

Graduada em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Pará-UFPA. Graduanda em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará-IFPA.

RAFAEL ROCHA

Graduado em Marketing (Estácio 2021), Técnico Têxtil (SENAI/CETIQT 1998), possui 20 anos de experiência em processos produtivos têxteis, com foco nas áreas de fiação, tecelagem e malharia.

AUTORES

Atuou em implementações/auditorias de certificações de qualidade. Trabalhou 11 anos no segmento Têxtil automotivo com foco nas áreas de Qualidade e desenvolvimento. Atualmente pesquisador do Instituto Senai de Inovação Biossintéticos e Fibras na plataforma Coordenação de Inovação em Fibras - SENAI CETIQT.

RAPHAEL BASILIO PIRES NONATO

Professor de Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), câmpus Xanxerê e doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba (UNISO).

REGINA APARECIDA SANCHES

Possui graduação em Engenharia Mecânica - Ênfase Têxtil pelo Centro Universitário da FEI (1987), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2001), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2006) e livre docência pela Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (2011). É professora associada da Universidade de São Paulo. É professora visitante da Universidade de Lisboa (Portugal), do Instituto Politécnico de Castelo Branco (Portugal) e da Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli (Itália). É pesquisadora da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (USP), do Centro de Investigação em Arquitetura, Urbanismo e Design (CIAUD) da Universidade de Lisboa (Portugal) e do Fashion Research Lab (FA.RE Lab) da Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli.

RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Graduado em Engenharia Mecânica (1988) pela UNESP, Mestrado (1991) e Doutorado (1998) pela UNICAMP, e desde 1992 é professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP de Ilha Solteira, sendo atualmente Professor Associado. Tem experiência na Área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Energia e Transferência de Calor, atuando principalmente nos seguintes temas: Otimização de Processos e Equipamentos Térmicos, Planejamento Energético, Biocombustíveis, Bioenergia, Motores de Combustão Interna, Geração e Cogeração de Energia. É coordenador do Grupo de Pesquisa do CNPq "Fontes Renováveis e Aproveitamento de Energia" e, também, do Laboratório Associado do Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP no Campus de Ilha Solteira.

ROBSON PEDERIVA

Professor titular da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) , com experiência na área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico, atuando principalmente nos seguintes temas: Vibrações de Máquinas e Estruturas, Monitoramento e Detecção de Falhas em Máquinas, Modelagem de Sistemas Mecânicos.

RODINEI MEDEIROS GOMES

Graduado em Engenharia Mecânica pela UFSC (1987), obteve o título de mestre em Processos de Fabricação em 1993 na mesma instituição. Realizou seu trabalho de tese de doutorado no Department of Metallurgy and Ceramics Science do Tokyo Institute of Technology sob orientação dos Profs. Tatsuo Sato e Akihiko Kamio em setembro de 1997. É Prof. do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPB desde 2001. Pesquisador do CNPq, coordenou mais de 10 projetos de pesquisa financiados pelo CNPq, CAPES e Petrobras. Atua na área de Engenharia de Materiais e Metalurgia,

TALITA GAMA DE SOUSA

Doutorado e Mestrado em Ciência dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia (IME). Possui graduação em Química titulação bacharel pela universidade Federal Fluminense (UFF).

AUTORES

THOMAZ AUGUSTO GUISARD RESTIVO

Professor Doutor em Engenharia de Materiais pela USP e docente do Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba (UNISO).

TIAGO SIMIONE AZZONI

Bacharelado em Engenharia Civil. Especialização em Gestão e Controle de Obras

VANESSA END DE OLIVEIRA

Professora Associada da Universidade Federal Fluminense do Campus Universitário de Rio das Ostras. Possui doutorado em Química pela Universidade Federal de Juiz de Fora, área de concentração Físico-Química em 2011. Os temas de trabalho abrangem a chamada "Química Supramolecular" estudando sistemas mistos formados entre diferentes porfirinas, oxocarbonos, esquaraínas e alguns metais da primeira série de transição. Destacam-se projetos associados à Química de produtos naturais de modo geral bem como suas relações com as principais técnicas espectroscópicas, trabalho estes realizados no Grupo de Espectroscopia Molecular (NEEM/UFJF) em Juiz de Fora, MG. Juntamente ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais UFF/Rio das Ostras realiza, dentre outros, projetos de investigação de processos corrosivos em diferentes materiais e meios.

VICTOR RODRIGUES DE LIMA

Bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás, UFG-GO. Monitor das disciplinas de circuitos elétricos 1, 2 e laboratório de circuitos elétricos (2019). Professor de física no cursinho federa de Goiás (2020-2021). Estágio na área de energia solar fotovoltaica na Agregar Engenharia (2020-2021).

VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI

Bacharelado em Engenharia Civil. Mestrado em Transportes. Doutorado em Engenharia de Transportes. Pós-doutorado em Engenharia de Transportes. Professor Universitário

WELLINGTON MATTOS PIRES

Mestrado em Ciência dos Materiais pelo Instituto Militar de Engenharia e engenharia mecânica pela Universidade Católica de Petrópolis.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson